



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ
LOŽISEK PRO VESMÍRNÉ APLIKACE**

MODIFICATION OF THE RIG FOR TESTING THE BEARINGS FOR SPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Škubna

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2021

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE



Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Michal Škubna
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. David Košťál, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukční úprava zařízení pro testování ložisek pro vesmírné aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající zařízení pro testování valivých ložisek v termální vakuové komoře umožňuje testování pouze jednoho konkrétního typu a rozměru ložiska. Cílem práce je úprava zařízení pro testování jiného rozměru ložiska pro potřeby aktuálního projektu – vývoj zařízení pro optickou komunikaci mezi satelity.

Typ práce: konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je konstrukční úprava zařízení pro jinou velikost ložiska.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popis současného stavu testovacího zařízení,
- koncepční návrh zařízení pro jiný typ ložiska,
- příprava výkresové dokumentace pro výrobu úpravy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukční úpravou stávajícího zařízení, určeného k ověření funkce valivých ložisek za vesmírných podmínek. Kvůli větším rozměrům nově testovaného ložiska není možno použít stávající zařízení, a proto je nutné jej upravit. Jednou z hlavních priorit je co největší využití stávajících komponent a zachování torzní tuhosti původního zařízení. Výstupem práce je průvodní zpráva a výkresová dokumentace pro výrobu nově navržených součástí včetně výkresu celkové sestavy zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vesmírná tribologie, ložiska, superduplexní ložisko, mechanismus polohování antény (APM)

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with design modification of current device, intended for function verification of rolling bearings under space conditions. Due to the larger dimensions of the newly tested bearing, the existing device cannot be used and therefore it is necessary to modify it. One of the main priorities is to use the most of existing components and maintain the torsional rigidity of the original device. The output of the work is an accompanying report and drawing documentation for production of newly designed components and drawing of full assembly of the device.

KEYWORDS

Space tribology, bearings, superduplex bearing, mechanism for antenna positioning (APM)

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKUBNA, Michal. *Konstrukční úprava zařízení pro testování ložisek pro vesmírné aplikace*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129698>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za jeho ochotu a cenné rady při vypracovávání této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Michal Škubna

OBSAH

ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE	2
ABSTRAKT	4
KLÍČOVÁ SLOVA	4
ABSTRACT	4
KEYWORDS	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	6
PODĚKOVÁNÍ	7
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE	7
1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Zařízení pro testování ložisek pro vesmírné aplikace	13
2.1.1 Vakuová komora	14
2.1.2 Příruba	15
2.1.3 Těsnicí potrubí	15
2.1.4 Hřídelová průchodka	16
2.1.5 Hřídel	16
2.1.6 Vlnovcové spojky	16
2.1.7 Pohon	17
2.1.8 Uchycení pohonu k přírubě	17
2.1.9 Temperace pohonu	19
2.1.10 Upevnění ložiska	19
2.1.11 Upevnění vnitřního kroužku ložiska	20
2.1.12 Upevnění vnějšího kroužku ložiska	21
2.1.13 Upevnění snímače krouticího momentu	22
2.1.14 Labyrintové těsnění	22
2.1.15 Tepelné mosty	23
2.2 Snímání polohy	23
2.2.1 Inkrementální odměřovací systémy	24
2.2.2 Absolutní odměřovací systémy	24
2.2.3 Optické snímače polohy	25
2.2.4 Inkrementální snímače úhlu natočení	25

3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cíl práce	26
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	27
4.1	Možnosti úpravy zařízení	27
4.1.1	Uložení zařízení do externí komory	28
4.1.2	Uložení zařízení do vlastní komory	30
4.1.3	Kontrola polohy ložiska	32
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	33
5.1	Vakuová komora	33
5.2	Torzní tuhost zařízení	37
5.3	Hřídel	39
5.4	Upevnění vnějšího kroužku ložiska	40
5.5	Upevnění vnitřního kroužku ložiska	41
5.6	Vnější klec	43
5.7	Snímání přesné polohy ložiska	43
5.8	Labyrint	45
5.9	Tepelné mosty	45
5.10	Celková dispozice zařízení	46
6	DISKUZE	47
7	ZÁVĚR	48
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
10.1	Seznam obrázků	51
10.2	Seznam grafů	52
11	SEZNAM TABULEK	53
12	SEZNAM PŘÍLOH	54

1 ÚVOD

Ložiska patří mezi nejvíce používané součásti v řadě strojních celků, kde je konán rotační nebo posuvný pohyb. Protože v řadě případů závisí na funkčnosti ložisek i funkčnost celého mechanismu, je snaha o určení jejich životnosti a chování při určitých podmínkách provozu.

Pro testování ložisek se používají zařízení, která jejich provoz simulují. Testuje se především životnost a spolehlivost. Při testování se pak měří jejich hluk při provozu, vibrace, odpor proti valení, nebo teplota kroužků.

Tato práce se bude zabývat konstrukční úpravou stávajícího zařízení určeného k testování superduplexního valivého ložiska s kosoúhlým stykem. Tato ložiska se mimo jiné používají k natáčení antén sloužících pro optickou komunikaci mezi vesmírnými satelity.

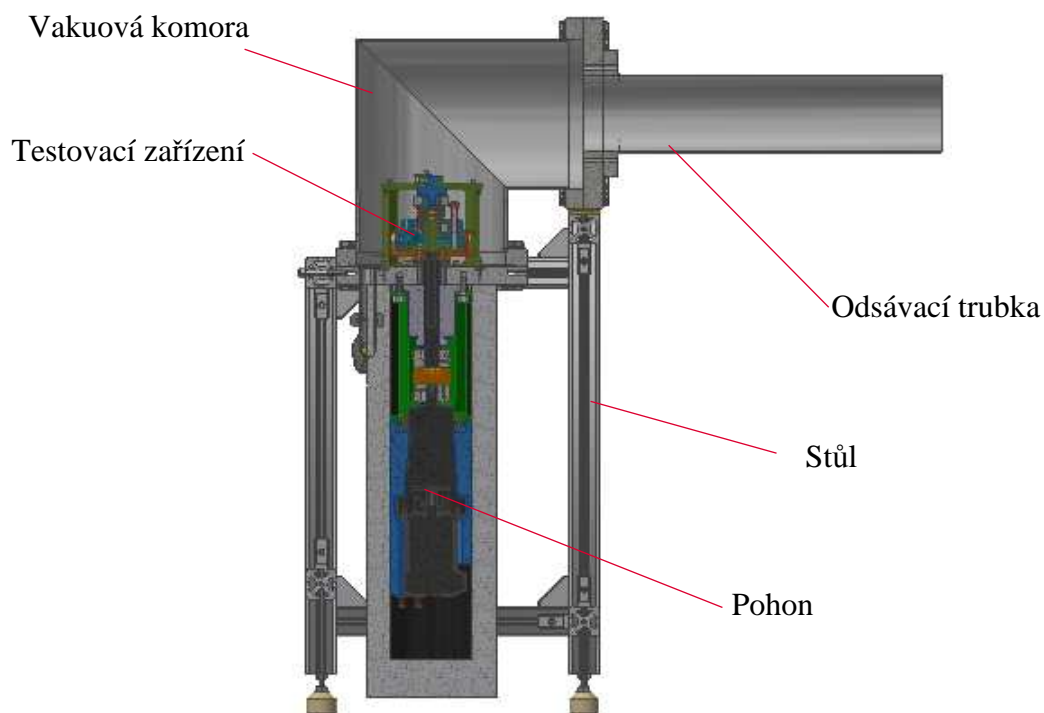
Prostředí, v němž bude ložisko pracovat, jej vystavuje značné zátěži. Navíc výměna ložiska u zařízení pracujících ve specifických podmínkách, a to zejména ve vesmíru, je spojena se značnými finančními náklady. Proto je nutné ložisko před tím, než začne plnit svou funkci při reálném provozu, řádně otestovat.

Cílem testování ložiska je tedy stanovení jeho životnosti a určení, zda je schopno pracovat při podmínkách oběžné dráhy Země. To obnáší jeho podchlazování, ohřívání a vystavování působení vakua.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Zařízení pro testování ložisek pro vesmírné aplikace

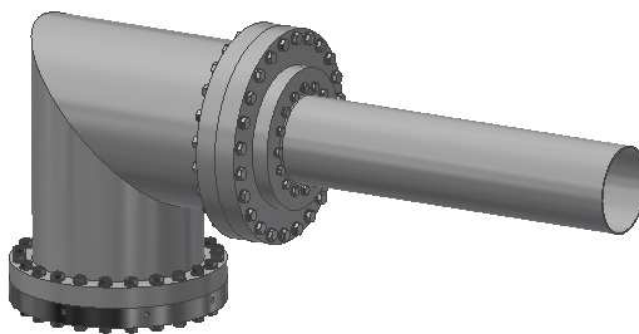
Jedná se o zařízení (viz Obrázek 2-1), které při testování dokáže nasimulovat podmínky oběžné dráhy Země. V zařízení ložisko koná specifický pohyb, kdy se nejedná o celé otáčky, ale pouze se pootočí v řádech několika stupňů. Tento způsob provozu způsobuje mnohem rychlejší a větší opotřebení. Při testování je ložisko střídavě ohříváno a ochlazováno. Ohřev a ochlazování je realizováno tak, že je celé zařízení vloženo do termální komory. Před prováděním testů ložiska se pomocí vývěvy vyčerpá vzduch z prostoru komory testovacího zařízení. Poté se v průběhu testování zaznamenává teplota a velikost odporu proti valení ložiska. Z naměřených dat se následně vyhodnotí, jak dobře ložisko při daných podmínkách pracovalo. Hnacím prvkem testovacího zařízení je motor vybavený enkodérem určeným ke sledování polohy hřídele. K motoru je připojena planetová převodovka. Krouticí moment je z motoru na hřídel přenesen pomocí vlnovcové spojky. K hřídeli je připevněn spodní přítlačný kroužek, kterým je v kombinaci s dalším kroužkem upevněn vnější kroužek ložiska. Předpětí vnitřního kroužku vůči vnějšímu je realizováno pomocí dvou unašečů. Z nich se krouticí moment dále přenáší přes další vlnovcovou spojku, která je připevněna ke snímači krouticího momentu. Ten je pak připevněn do horního víka vnější klece. Vnější klec je pevně přišroubována k přírubě. Pro dosažení vakua v zařízení je k přírubě přišroubováno koleno tvořící vakuovou komoru. Na toto koleno je dále připojena trubka, která plní funkci odsávacího potrubí pro připojení k vyvěvě. Teplota je sledována pomocí termočlánků umístěných na přítlačných kroužcích tak, aby byly co nejbližší k ložisku. Dráty od termočlánků a kabely od snímače krouticího momentu jsou přes přírubu pomocí trubky, v níž jsou uloženy speciální průchodky, vyvedeny ven ze zařízení. Celé zařízení je připevněno k přenosnému stolu vyrobenému z hliníkových profilů.



Obrázek 2-1 - Dispozice původního zařízení

2.1.1 Vakuová komora

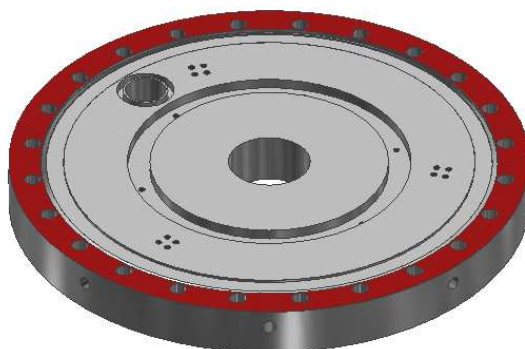
Komora (viz Obrázek 2-2) je tvořena kolenem DN200 CF a odsávacím potrubím DN100. Kleno je vytvořeno jako svařenec dvou kusů potrubí, u nichž je jedna strana seříznuta pod úhlem 45°. Ke kleno je přivařena příruba, pomocí níž je přišroubováno k přírubě tvořící základnu zařízení. Na druhém konci kleno je přišroubována redukce, na níž se pomocí šroubů M8 připevní potrubí vedoucí na vývěvu. Součásti spojené pomocí šroubových spojů jsou utěsněny pomocí měděných kroužků.



Obrázek 2-2 - Původní vakuová komora

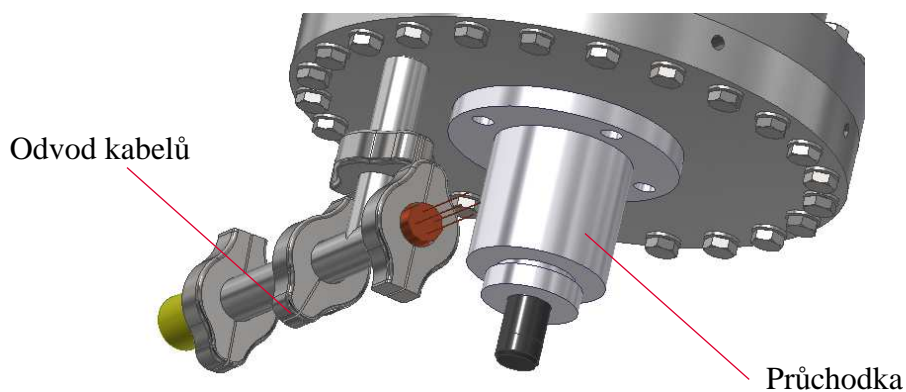
2.1.2 Příruba

Příruba tvoří základnu celého zařízení. Spojuje prakticky všechny části zařízení. Další funkcí příruby je upevnění zařízení ke stolu pomocí čtyř šroubů M8. Jedná se o přírubu DN200 CF (ConFlat). Horní část (viz Obrázek 2-3) slouží pro upevnění tepelných mostů sloužících pro rychlejší výměnu tepla a klece, v níž je upevněn snímač krouticího momentu.



Obrázek 2-3 Pohled na přírubu shora

Na spodní části příruby (viz Obrázek 2-4) jsou vyvrtány čtyři slepé otvory pro šrouby M8 k připevnění příruby pohonu a hřídelové průchodky. Skrze přírubu je zhotoven kromě otvoru pro průchodku také otvor o průměru 20 mm pro těsnicí potrubí, které slouží k odvodu kabelů a drátů od měřicích přístrojů.



Obrázek 2-4 - Spodní strana příruby

2.1.3 Těsnicí potrubí

Těsnicí potrubí je dodáno firmou Pfeiffer Vacuum a je k přírubě přivařeno. Součástí tohoto potrubí pro odvod kabelů jsou speciální průchodky. Jednotlivé fitinky potrubí jsou spojeny pomocí speciálních svorek typu ISO KF-DN16.

2.1.4 Hřídelová průchodka

Aby se v komoře neporušilo vakuum, musí být hřídel dobře utěsněn. Proto bylo použito vakuové průchodky obsahující ferofluidní kapalinu, O-kroužek pro utěsnění spojení s přírubou a permanentní magnet. Obsahuje také kanálky, do nichž se dá zavést temperační kapalina. Tato průchodka typu KLFD je zakoupena od firmy Kurt J. Lesker.

2.1.5 Hřídel

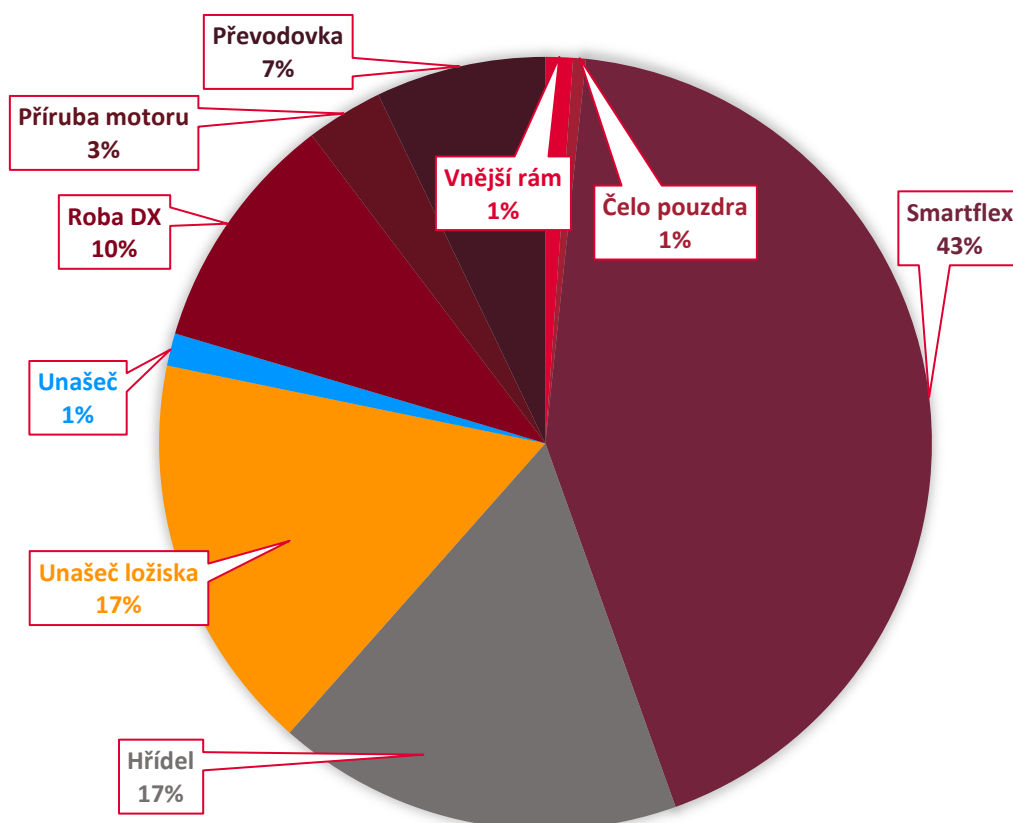
Hřídel (viz Obrázek 2-5) je spojen s pohonem pomocí vlnovcové spojky. Vede skrze průchodku (viz 2.1.4) a přenáší pohyb z motoru a převodovky do spodního přítlačného kroužku. Tento kroužek je k hřídeli upevněn pomocí čtyř šroubů M5, pro něž jsou v hřídeli zhotoveny otvory. Od spodního přítlačného kroužku je hřídel izolován pomocí izolačního kroužku. Pro minimalizaci přenosu tepla, je hřídel z horní části vrtán.



Obrázek 2-5 – Hřídel

2.1.6 Vlnovcové spojky

Pro zajištění přenosu krouticího momentu z hřídele převodovky na hřídel testovacího zařízení je použita vlnovcová spojka ROBA DX-1. Spojení spodního unašeče ložiska se snímačem krouticího momentu zajišťuje druhá spojka Smartflex. Spojky do určité míry dokáží korigovat nepřesnosti v souosostech jednotlivých komponent, naproti tomu však mají malou torzní tuhost, což může způsobovat nepřesnosti při měření krouticího momentu. Tyto spojky, především spojka Smartflex, mají také největší vliv na celkovou torzní tuhost zařízení (viz Graf 1).



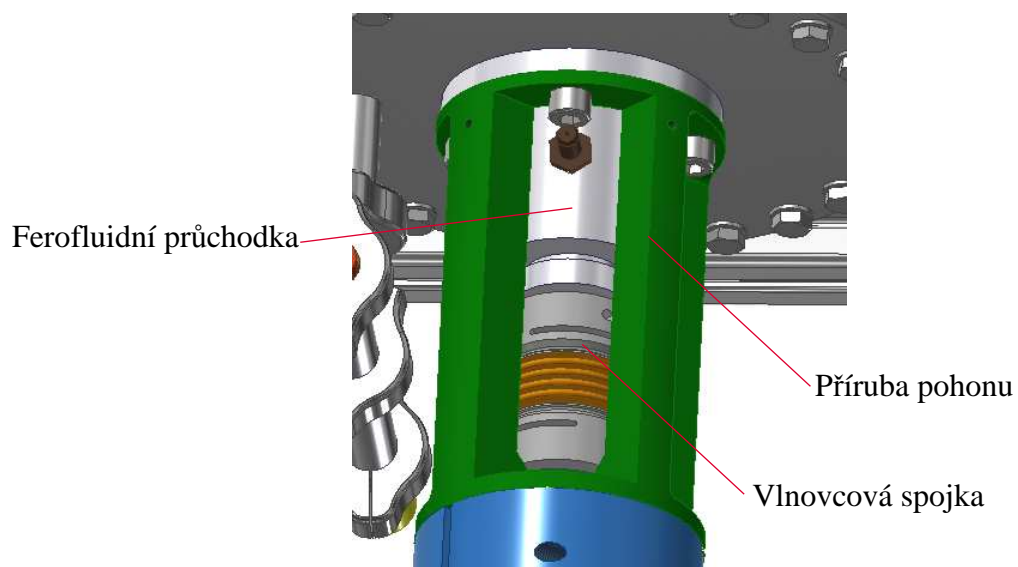
Graf 1 - Vliv jednotlivých součástí na torzní tuhost

2.1.7 Pohon

Pohon zařízení je realizován pomocí čtyřpólového synchronního motoru typu 8LVA23 od firmy B&R v kombinaci s planetovou převodovkou typu 8GP60 od stejné firmy. Motor obsahuje enkodér zajišťující snímání polohy hřídele.

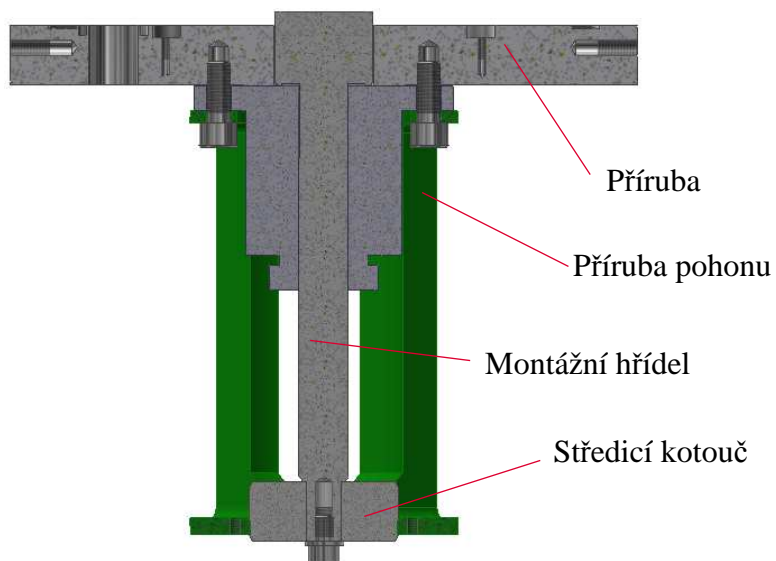
2.1.8 Uchycení pohonu k přírubě

Motor a převodovka jsou uchyceny k přírubě (viz Obrázek 2-6). Ta je souose sešroubována s hřídelovou průchodkou. V přírubě je spojen hřídel převodovky s hřídelem zařízení pomocí vlnovcové spojky, takže zde musí být zajištěn prostor pro montáž této spojky.



Obrázek 2-6 - Uchycení příruby

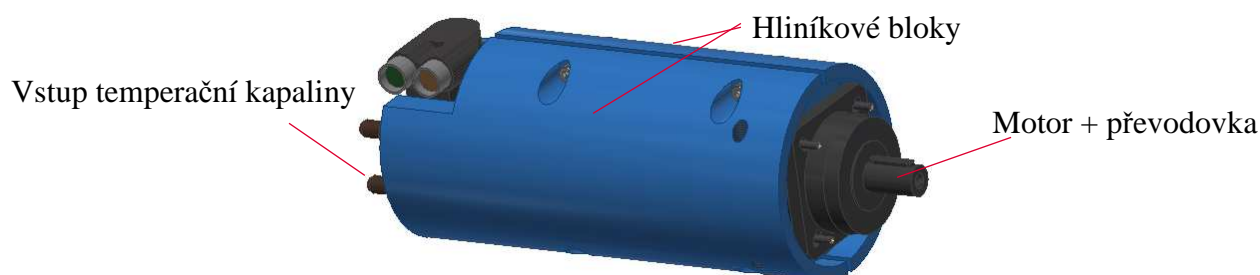
Pro minimalizaci nepřesností musí být příruba přesně vycentrována s ostatními součástmi pomocí přípravku (viz Obrázek 2-7). Tento montážní hřídel tvoří uložení s dírou vyvrtanou v přírubě. Na druhém konci hřídele je nasunut kotouč axiálně zajištěný šroubem M6. Pomocí tohoto kotouče, který s dírou v přírubě pohonu tvoří uložení je zajištěno i její vycentrování.



Obrázek 2-7 - Centrování příruby motoru

2.1.9 Temperace pohonu

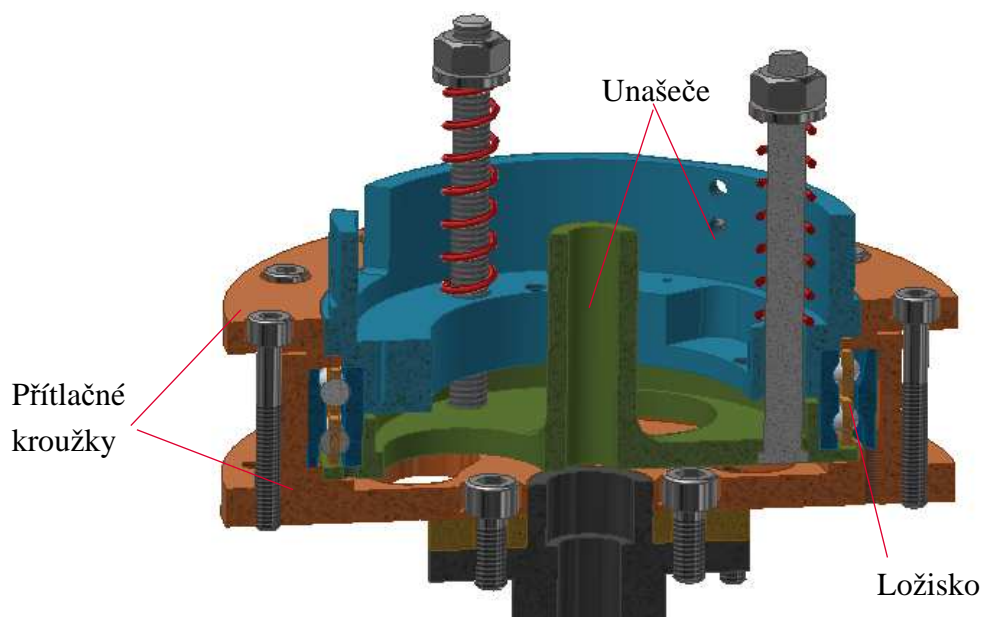
Díky tomu, že je zařízení vystaveno nízkým i vysokým teplotám, je nutné pohonnou jednotku temperovat. K temperování slouží dva hliníkové bloky, které obepínají motor a převodovku. Vnitřní tvar bloků kopíruje tvar těchto komponent (viz Obrázek 2-8). Bloky obsahují systém kanálků, v nichž může proudit temperační kapalina. Tyto bloky jsou k sobě přišroubovány. Protože by mohlo dojít i k poškození hřídelové ferrofluidní průchodky, je nutná také její temperace (viz 2.1.3).



Obrázek 2-8 - Temperace pohonu

2.1.10 Upevnění ložiska

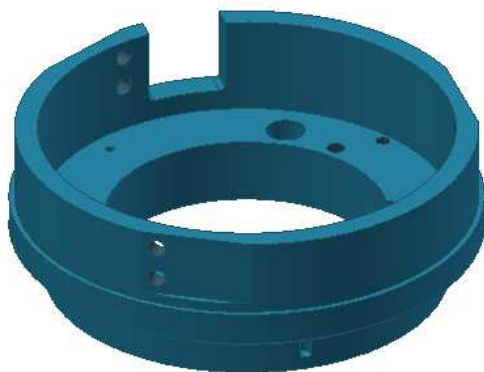
V zařízení je testované ložisko upevněno pomocí dvou přitlačných kroužků, které obepínají vnější kroužek ložiska. Vnitřní kroužek je upevněn pomocí dvou unašečů. Ty také zajišťují předpětí vnitřního kroužku (viz Obrázek 2-9) ložiska.



Obrázek 2-9 - Upevnění ložiska

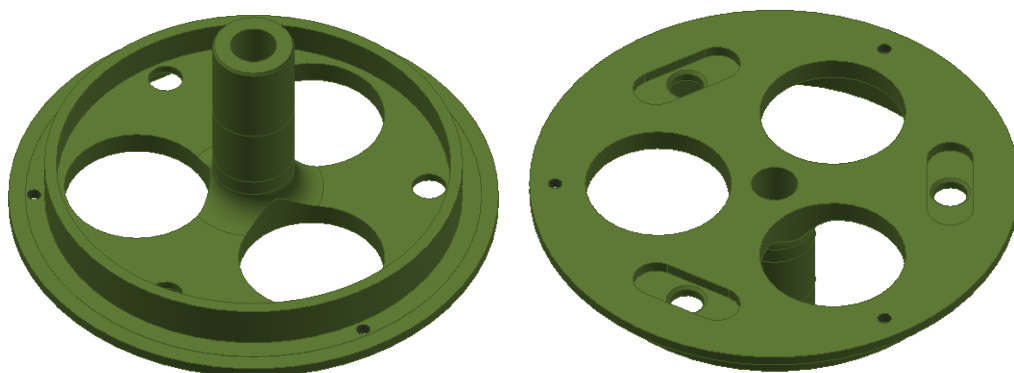
2.1.11 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Upevnění a předeptnutí vnitřního kroužku ložiska je zprostředkováno pomocí dvou unašečů. Na horní unašeč (viz Obrázek 2-10) je možno připevnit tepelné mosty a termočlánky sledující teplotu. Tepelné mosty jsou připevněny pomocí šroubů na obvod unašeče, kde jsou pro tento účel vyfrézovány tři rovinné plochy. Na průměru, který se dotýká ložiska, jsou otvory pro tři šrouby M3, aby bylo možno ložisko vyjmout bez poškození.



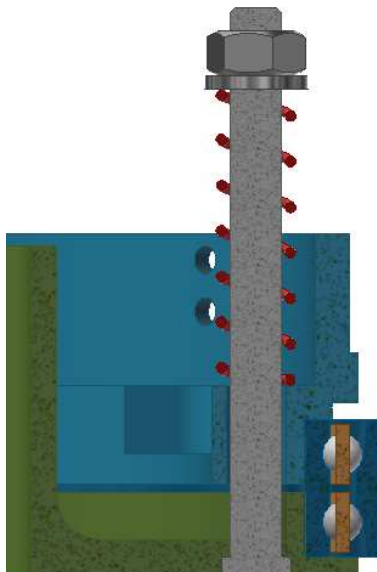
Obrázek 2-10 - Horní unašeč

Spodní unašeč (viz Obrázek 2-11), který je připojen k vlnovcové spojce, obsahuje také tři otvory pro šrouby M3, do nichž je možno zašroubovat šrouby pro lepší vyndání ložiska z unašeče. Dále obsahuje tři otvory pro čepy. Ty jsou rozmístěny po 120°, což zajišťuje rovnoměrné předeptnutí vnitřního kroužku ložiska. Ze spodní strany jsou zde vyfrézovány drážky, do nichž tvarově zapadají hlavičky předepínacích čepů z důvodu usnadnění montáže. Pro minimalizování hmotnosti jsou ve spodním unašeči vyvrtány tři odlehčovací otvory.



Obrázek 2-11 - Spodní unašeč shora (vlevo) a zespodu (vpravo)

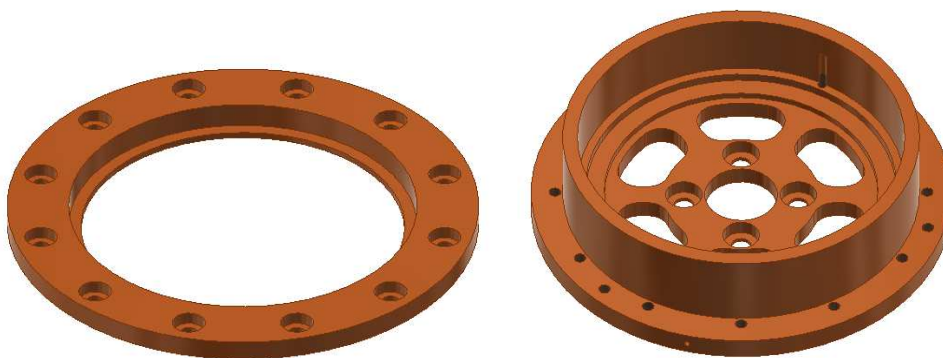
Předeprnutí horního a spodního unašeče je realizováno pomocí pružin Alcomex D2170 nasazených na trnech a dotažených maticemi s podložkami. Dotažením matice na pružinu je způsobeno, že trn přitlačí spodní unašeč k hornímu (viz Obrázek 2-12).



Obrázek 2-12 - Předeprnutí unašečů

2.1.12 Upevnění vnějšího kroužku ložiska

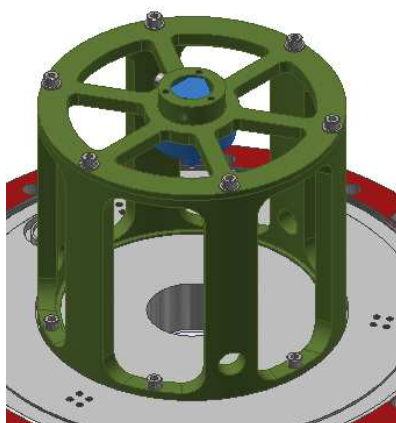
Je realizováno pomocí dvou přitlačných kroužků. Spodní přitlačný kroužek (viz Obrázek 2-13) je připevněn ke hřídeli pomocí čtyř šroubů M5. Od hřídele je oddělen pomocí izolace, aby se minimalizoval přenos tepla. Vnější průměr horního a vnitřní průměr spodního kroužku spolu tvoří uložení. Jsou k sobě přitlačovány pomocí dvanácti šroubů M4, aby bylo sevření rovnoměrné. Ve spodním kroužku jsou stejně jako u unašečů tři otvory pro šrouby M3, aby bylo možno ložisko z kroužku bezpečně a bez poškození vyjmout. Spodní kroužek má na svém dně vyfrézované šest odlehčovacích otvorů.



Obrázek 2-13 - Horní (vlevo) a spodní (vpravo) přitlačný kroužek

2.1.13 Upevnění snímače krouticího momentu

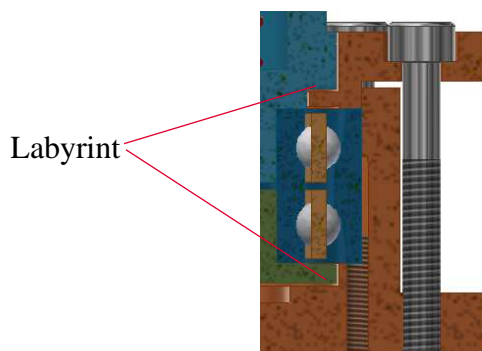
Krouticí moment na ložisku je snímán pomocí snímače TQM201 od firmy Omega. Ten je upevněn v kleci (viz Obrázek 2-14), která je rozdělena na dvě části z hlediska jednodušší montáže. Skládá se z pouzdra, které je upevněno pomocí šesti šroubů M4 do drážky v přírubě a horního víka. Pouzdro a víko jsou k sobě sešroubovány taktéž pomocí šesti šroubů M4. Ve středu horního pouzdra je upevněn samotný snímač zajištěný šroubem M4. Klec je navržena tak, aby zajistila dostatečnou torzní tuhost zařízení. Musí také umožňovat odvod kabelů od měřicích přístrojů a poskytovat prostor pro montáž a demontáž vlnovcové spojky.



Obrázek 2-14 - Klec pro snímač krouticího momentu

2.1.14 Labyrintové těsnění

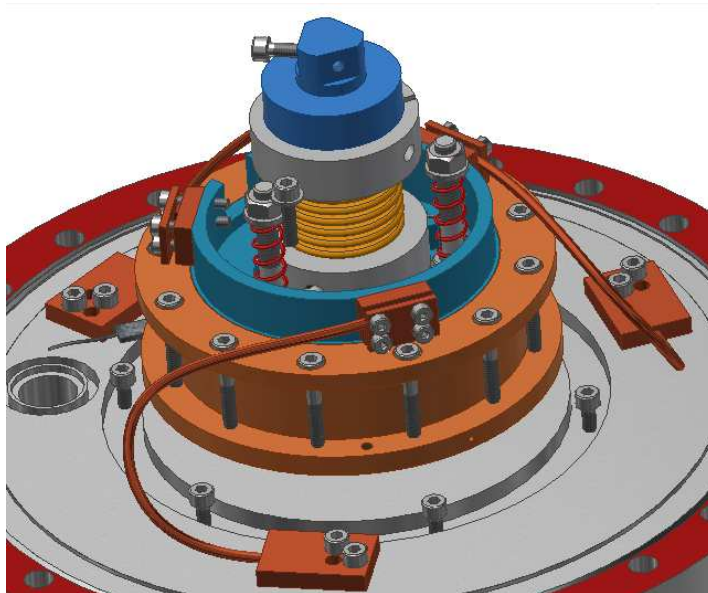
Díky působícímu vakuu a změně teplot dochází u ložiska k vypařování maziva. Aby se vypařování co nejvíce minimalizovalo, je mezi kroužky a unašeči vytvořeno labyrintové těsnění (viz Obrázek 2-15). Jde o tenkou mezeru mezi součástmi, která zabraňuje tvorbě vakua v místech upevnění ložiska.



Obrázek 2-15 - Labyrint mezi součástmi

2.1.15 Tepelné mosty

Z důvodu potřeby zrychlení výměny tepla mezi jednotlivými součástmi jsou do zařízení přidány tepelné mosty. Jelikož přenos tepla konvekci je ve vakuovém prostředí omezen, je výhodnější využít principu přenosu tepla vedením. Tepelné mosty musí být upevněny na součástech, které nekonají pohyb. Jsou konstruovány jako měděné destičky. Tyto destičky jsou následně spojeny pomocí měděných vodičů.



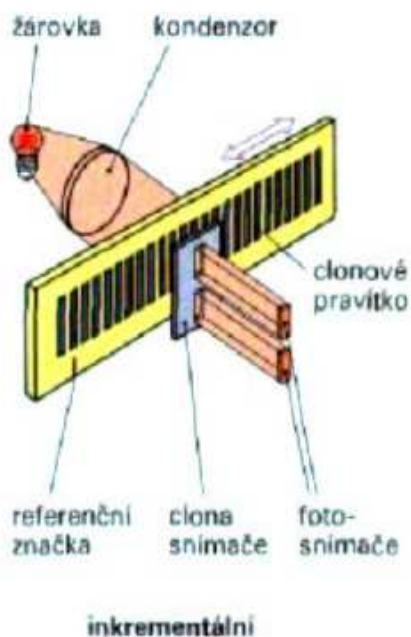
Obrázek 2-16 - Tepelné mosty

2.2 Snímání polohy

Odměřovací systémy snímají pomocí indukčních nebo magnetických snímačů tzv. „ozubené“ kotoučky nebo optickým principem čárky „proužky“ průhledného (clonového) nebo reflexního pravítka či kotoučku. Pro optický princip snímání polohy lze využít i systém přímého odečtení kódem určené polohy. Snímané údaje zpracovává CNC řídicí systém. Clonová pravítka nebo kotoučky bývají buď šterbinová, skleněná s kovovými (napařenými) čárkami nebo plastová s čárkami vytvořenými laserovým paprskem. Tyto optické snímače pracují na principu světelné závory. Magnetické snímače pracují na principu Hallovy sondy. Nejpresnější hodnoty poskytují přímé odměřovací systémy. Nejčastějším použitím jsou inkrementální (přírůstkové) odměřovací systémy [1].

2.2.1 Inkrementální odměřovací systémy

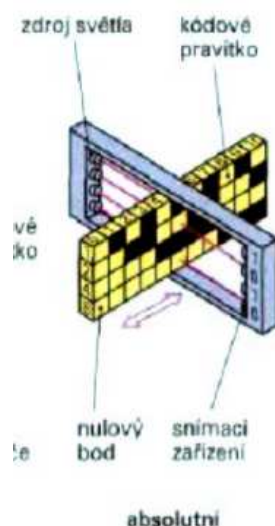
V tomto systému (viz Obrázek 2-17) se přičítají nebo odečítají počty impulzů odpovídající optickým snímačem načteným čárkám na pravítku nebo clonovém kotoučku. Jejich počet odpovídá velikosti dráhy mezi dvěma polohami. Současně jsou snímány referenční znaky určitých známých poloh, aby systém našel polohu po zapnutí stroje nebo výpadku proudu. Problémem v používání inkrementálního odměřovacího systému musí stroj po zapnutí vždy napájení najet nejprve na referenční značky, aby nastavil nuly v odměřování polohy v jednotlivých osách [2].



Obrázek 2-17 - Princip inkrementálního odměřování [2]

2.2.2 Absolutní odměřovací systémy

Při absolutním odměřování se používají kódová pravítka a (kotoučky) úhломěry, které jsou snímány více snímači. Kombinace tmavých a průhledných míst je kódem čísla, které udává souřadnici, tj. absolutní polohu. Po zapnutí stroje zná řídicí systém přesně polohu suportů, resp. nástroje, aniž by musel najíždět do referenčních poloh (viz Obrázek 2-18) [2].



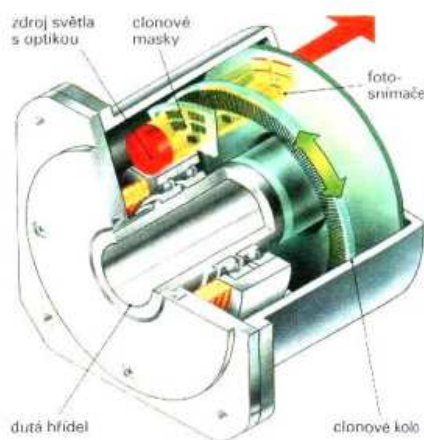
Obrázek 2-18 - Princip absolutního odměřování [2]

2.2.3 Optické snímače polohy

Díky vysoké citlivosti a možnosti realizace v malých rozměrech jsou tyto snímače velmi výhodné. Pro snímače polohy se používají prakticky všechny typy světelného a infračerveného záření. Základní rozdělení je podle typu výstupního signálu na snímače analogové a snímače číslicové [2].

2.2.4 Inkrementální snímače úhlu natočení

Inkrementální snímače úhlu natočení se používají k měření úhlu natočení (viz Obrázek 2-19) měřeného zařízení. Čárky pro přerušování světelného paprsku jsou na obvodovém mezikruží clonového kola. Snímače světelného paprsku jsou opět opatřeny clonovými maskami vzájemně posunutými o $1/4$ clonového (čárového) intervalu [2].



Obrázek 2-19 – Princip inkrementálního snímače úhlu natočení [2]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z výše uvedené rešerše původního testeru plyne, že zařízení je konstruováno jako jednoúčelové, tedy použitelné pouze pro jeden konkrétní typ ložiska. Hlavním úkolem zařízení je testování životnosti ložisek vystavených specifickým podmínkám ve vesmírném prostoru. Konkrétně jsou to podmínky při provozu satelitů obíhajících kolem Země. Pro potřeby testování nového typu ložiska je však nutno na stávajícím zařízení provést úpravy z důvodu výrazně jiných rozměrů ložiska.

Důležitým faktorem pro modifikaci byla velká finanční náročnost výroby původního zařízení. Proto je nutno úpravu koncipovat tak, aby bylo využito co nejvíce původních komponent a minimalizovaly se tak náklady na výrobu nových komponent. Dalším úkolem je zapracovat do zařízení systém, který umožní snímání přesné polohy ložiska.

Hlavním problémem při úpravě je rozměr ložiska, které je výrazně větší, než pro jaké bylo původní zařízení konstruováno. Jedná se o superduplexní ložisko s kosoúhlým stykem a děleným vnitřním kroužkem, který bude axiálně předeprnut proti vnějšímu kroužku. Uložení ložiska v zařízení musí být takové, aby jej bylo po testování možno vyjmout bez poškození k účelům provádění dalších analýz.

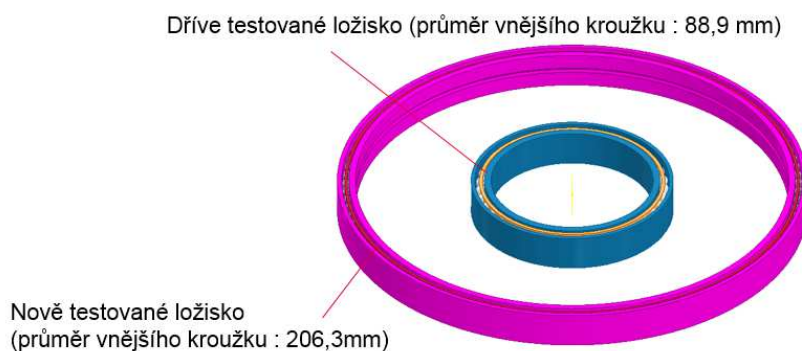
3.2 Cíl práce

Cílem práce je provést úpravu stávajícího zařízení pro testování většího ložiska pro potřeby aktuálního projektu – vývoj zařízení pro optickou komunikaci mezi satelity. Zde je nutno maximální využití stávajících komponent. Nedílnou součástí je tvorba 3D modelu nového zařízení, zpracování výkresové dokumentace k potřebám výroby nových komponent a sestava pro potřeby montáže a nákupu komponent.

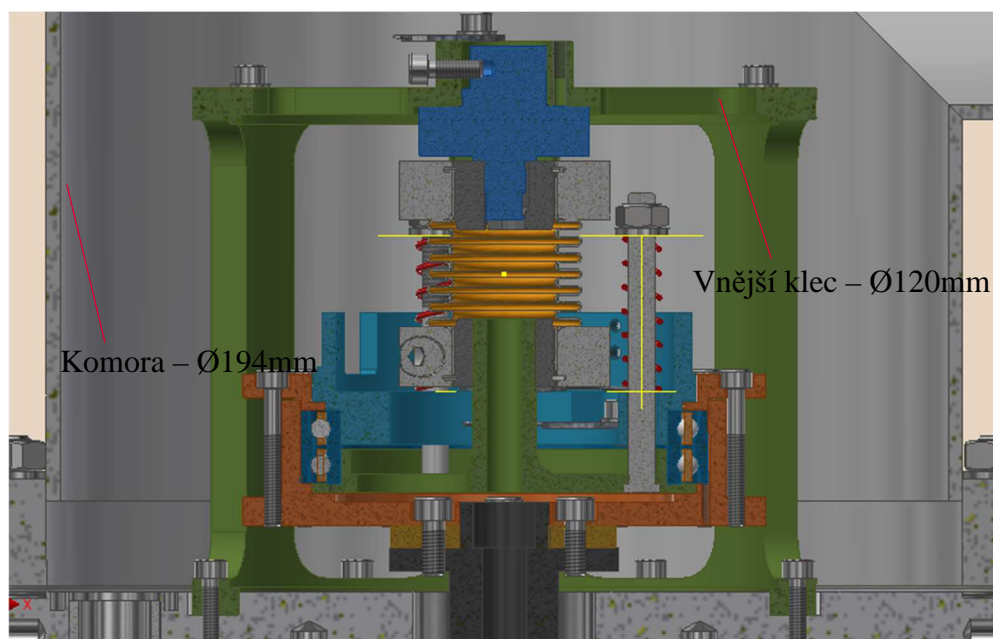
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Možnosti úpravy zařízení

Vzhledem k tomu, že nově testované ložisko je výrazně větší (viz Obrázek 4-1) a svým vnějším průměrem přesahuje i největší rozměry vnější klece a maximální rozměry vakuové komory by neposkytovaly dostatečný prostor pro zařízení (viz Obrázek 4-2), nelze nijak využít většinu původních komponent ani původní vakuovou komoru.



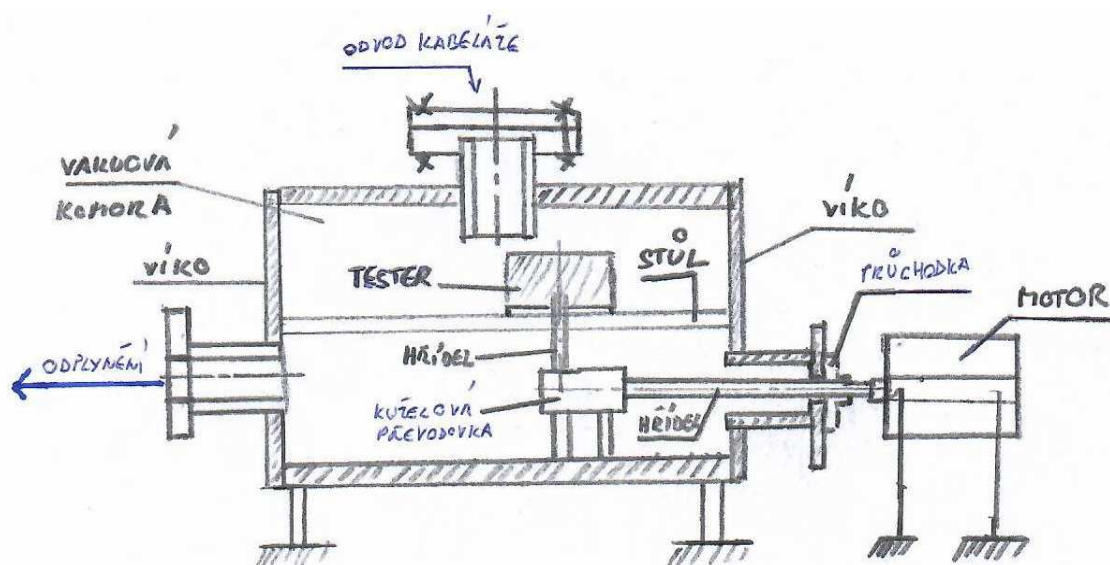
Obrázek 4-1 - Porovnání velikostí testovaných ložisek



Obrázek 4-2 - Rozměry původního zařízení

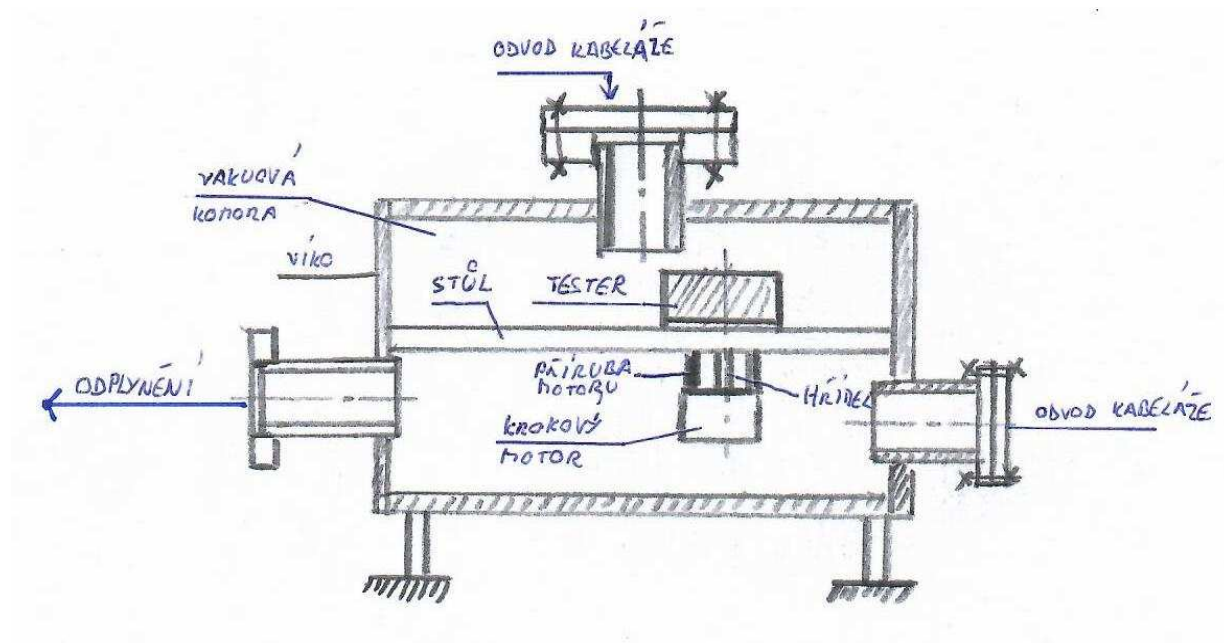
4.1.1 Uložení zařízení do externí komory

Prvním konceptem je uložit tester do externí vakuové komory. Hlavní výhodou by byla snadnější montáž a demontáž. Ale vzhledem k prostoru v komoře, která je k dispozici by toto řešení s sebou neslo také řadu problémů. Pro zařízení je v komoře dostatek místa, ale hlavním problémem je umístění pohonné jednotky. Jelikož stávající pohon není vhodný pro použití ve vakuovém prostředí, musel by být uložen mimo působení vakua – venku z komory (viz Obrázek 4-3). Stávající pohonnou jednotku by bylo také nutno doplnit o kuželovou převodovku díky tomu, že by pro souosé připojení pohonu nebyl v komoře dostatek místa. To by však následně způsobilo snížení přesnosti zařízení díky vůlím v převodovce. Dalším problémem by bylo vyvedení hnaného hřídele převodovky z komory ven.



Obrázek 4-3 - Koncept s použitím kuželové převodovky

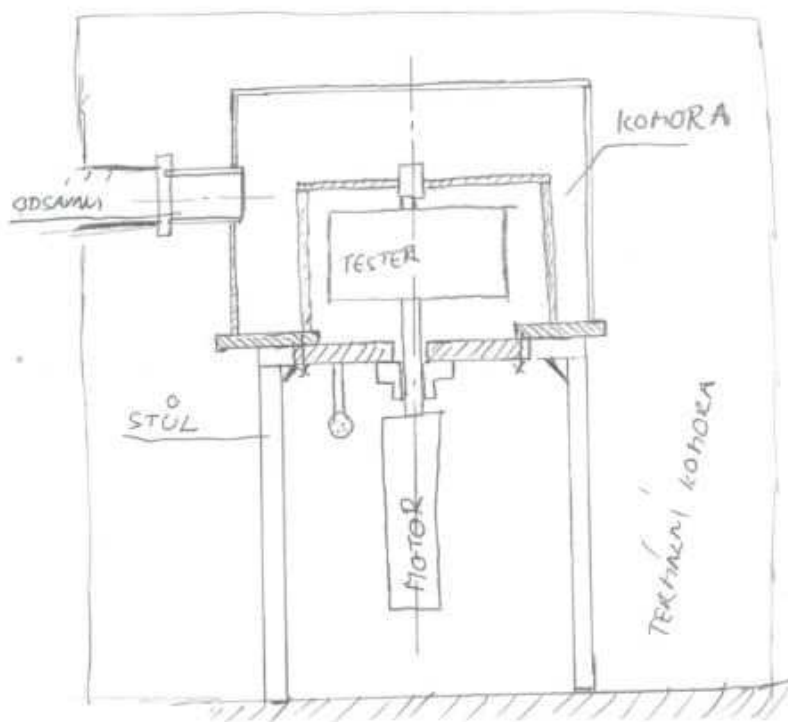
Druhou možností tohoto konceptu je použití krokového motoru do vakua (viz Obrázek 4-4). Řešení by uspořilo místo a bylo by možno kompletní zařízení umístit do komory, ovšem by se musel kompletně přenastavit a přeprogramovat pohonný systém. Výsledkem toho by bylo zvýšení nákladů na zařízení.



Obrázek 4-4 Koncept s krokovým motorem

4.1.2 Uložení zařízení do vlastní komory

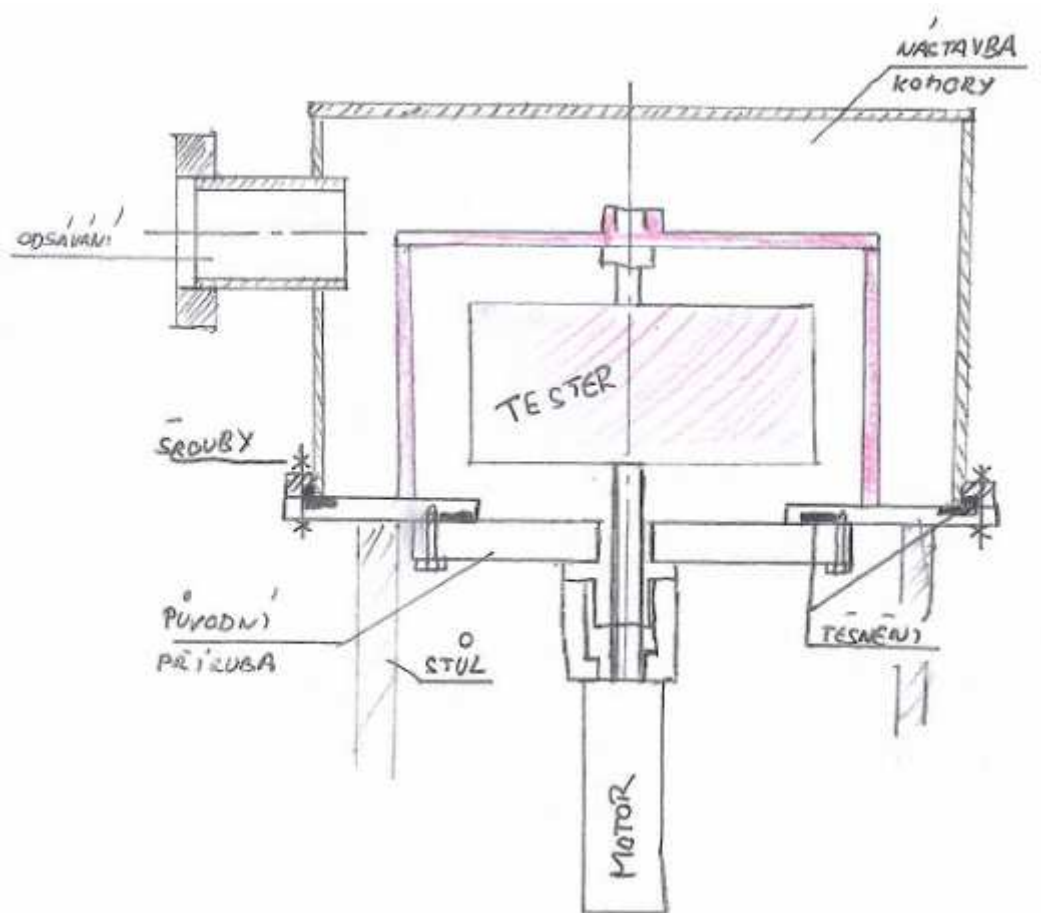
Druhý koncept (viz Obrázek 4-5) spočívá v uložení nového zařízení do vlastní vakuové komory. Zde půjde plně využít stávající pohonnou jednotku, čímž se minimalizují nepřesnosti. Výhoda tohoto konceptu je jednodušší konstrukce. Samotné zařízení vychází ze stejného konceptu jako zařízení původní.



Obrázek 4-5 – Dispozice zařízení ve vlastní komoře

Úprava vakuové komory

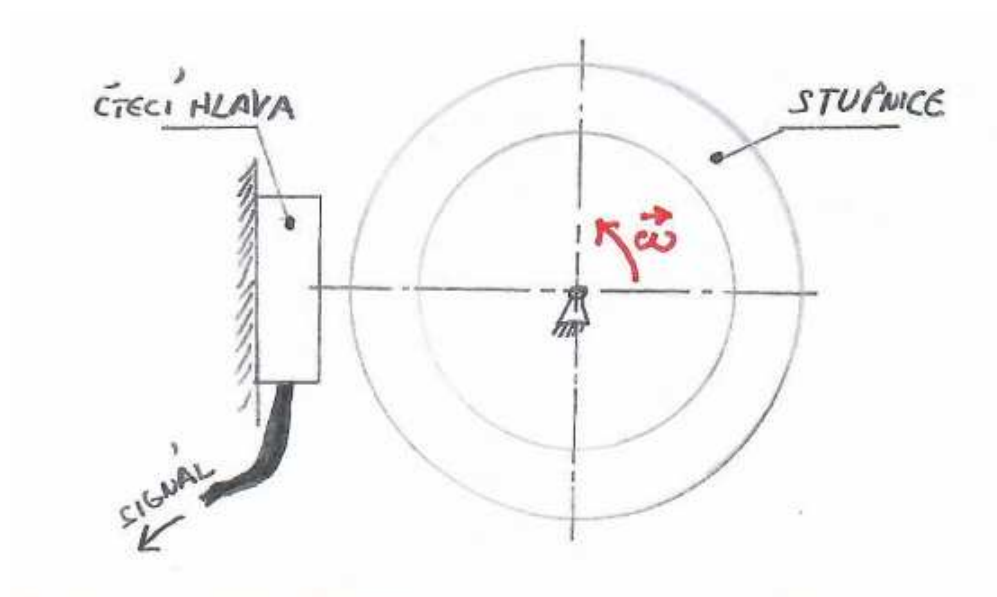
Z obrázků 4-1 a 4-2 plyne, že do původní komory, kterou tvoří koleno, se ložisko nevejde. Proto je třeba vyrobit novou komoru. Nová komora (viz Obrázek 4-6) je řešena jako nástavba na přírubu z původního zařízení tak, aby bylo možno použít co nejvíce původních dílů, zejména ze spodní části zařízení.



Obrázek 4-6 - Dispozice nové komory

4.1.3 Kontrola polohy ložiska

Dílčím úkolem bylo zakomponovat do zařízení systém pro snímání přesné polohy ložiska. Z předchozí verze zařízení je enkodér sice již součástí motoru. Ukazuje ale polohu hřídele s chybou díky vůlím v motoru a převodovce. Pro zpřesnění měření polohy vnějšího kroužku ložiska je zapotřebí kontrolovat i polohu některé z pohyblivých součástí co nejbližší ložisku. Kontrola polohy je řešena optickou čtecí hlavou a rotační úhlovou stupnicí (viz Obrázek 4-7).



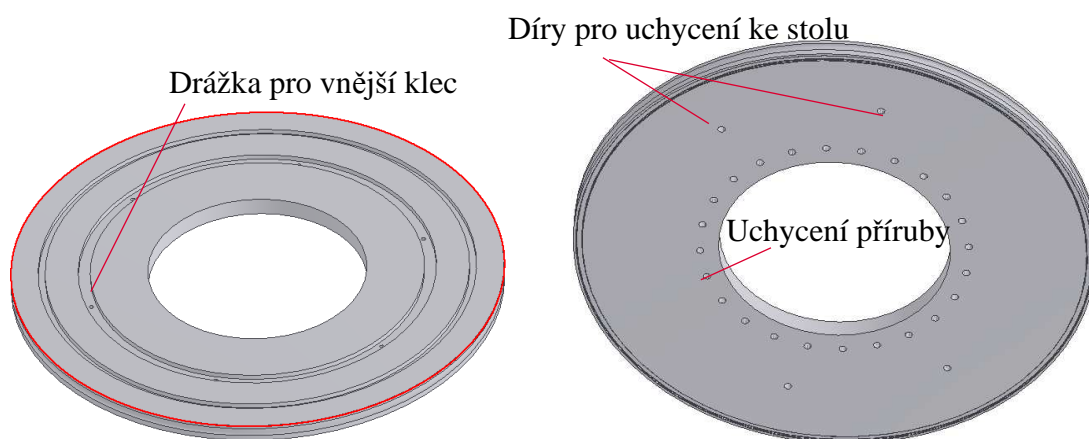
Obrázek 4-7 - Měření polohy pomocí rotační stupnice

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Předchozí kapitola řešila dvě možnosti úpravy zařízení. První možnost uvažovala umístění zařízení do externí vakuové komory. Druhá možnost počítá s výrobou vlastní vakuové komory. U ani jedné z variant není možno použít většinovou část původních komponent. Avšak díky možnosti použití původní pohonné jednotky a tím zjednodušení jak provozu, tak montáže, bude realizována druhá varianta úpravy. Všechny nové komponenty budou vyrobeny z nerezové oceli 304L.

5.1 Vakuová komora

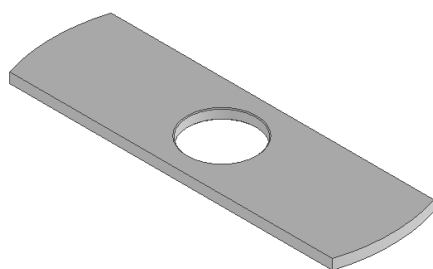
Kvůli velikosti testovaného ložiska (viz 4.1) je nutno značně zvětšit průměr vakuové komory tak, aby se do ní vešly všechny potřebné prvky. Vnitřní průměr komory byl zvolen DN 400, je tedy možno použít normalizované díly. Příruba, která tvoří základnu pro celé zařízení je upravena tak aby se mohla připevnit k přírubě z původního zařízení a také aby fungovala jako nosný prvek celého zařízení. Jedná se o modifikovanou zaslepovací přírubu ISO K-DN400. V přírubě je vyvrtána přesná díra o průměru 200 mm v toleranci G7. Ta slouží jednak pro vzájemné vystředění nové příruby s přírubou původní, tak také aby původní příruba mohla plnit všechny své funkce, které plnila před tím. Na horní straně příruby se nachází drážka, v níž bude usazena vnější pevná klec a následně připevněna šesti šrouby M4. Ze spodní strany jsou zhotoveny slepé díry pro závit M8. Dvacet čtyři děr kolem obvodu slouží k upevnění původní příruby. Další čtyři díry blíže vnějšímu průměru příruby slouží k připevnění zařízení ke stolu (viz Obrázek 5-1).



Obrázek 5-1 Příruba z horní strany (nalevo) a ze spodní strany (napravo)

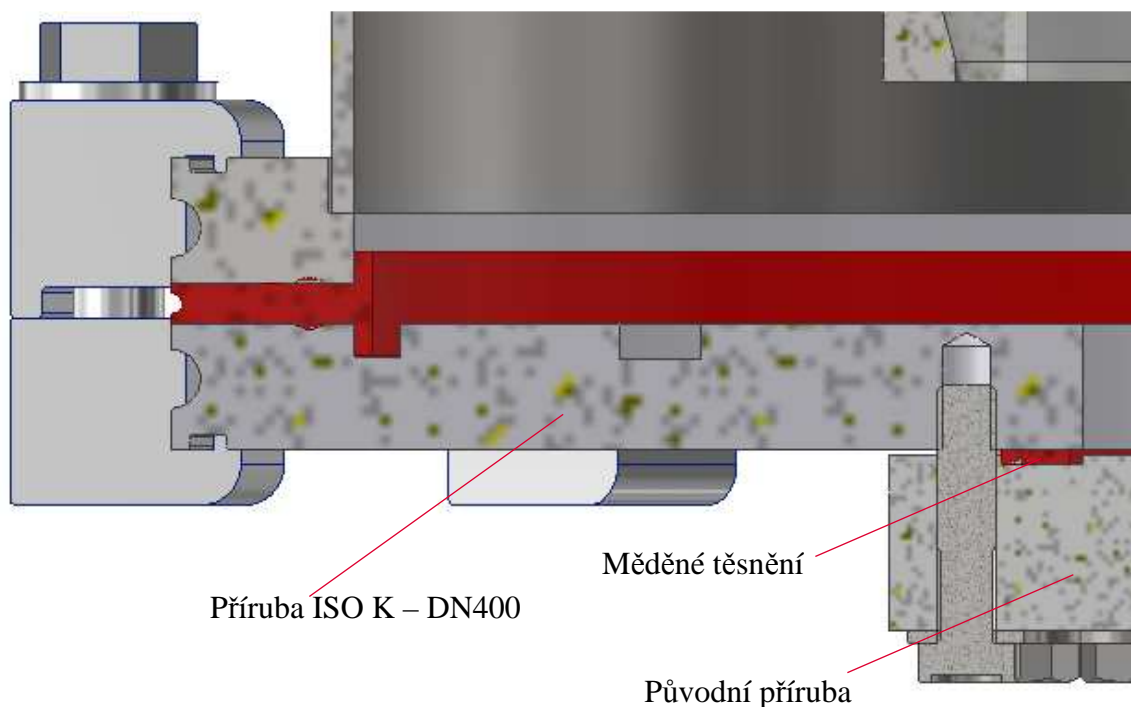
Spodní část komory – centrování přírub

Vzhledem k tomu, že větší příruba slouží jako základna pro uchycení nové vnější klece, jsou zde kladeny přísné požadavky na souosost s původní přírubou. Centrování je provedeno pomocí přípravku (viz Obrázek 5-2) nalisovaném na montážním hřídeli, který slouží i k vycentrování hřídelové průchodky a příruby pohonu. Přípravek je vyroben z plechu tloušťky 6 mm. Velký průměr přípravku o průměru 200 mm je vyroben v toleranci h6. Uložení přípravku a příruby tak zajistí dostatečně přesné vzájemné vycentrování přírub.



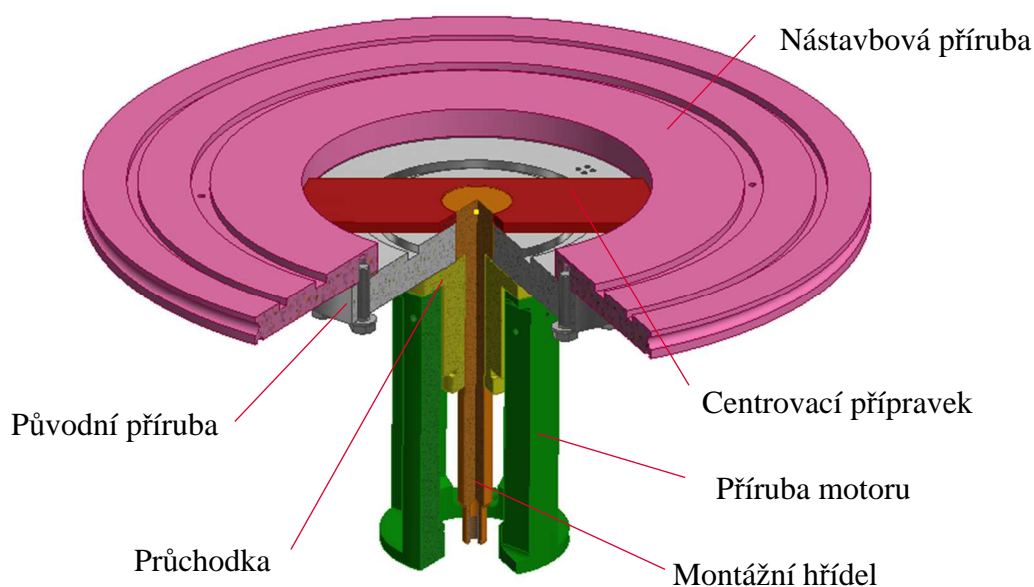
Obrázek 5-2 - Centrovací přípravek

Montážní hřídel, na němž je nalisován přípravek se vloží do hřídelové průchodky v původní přírubě. Na tuto přírubu se následně uloží měděné těsnění a příruba ISO K (viz Obrázek 5-3).



Obrázek 5-3 - Těsnění přírub

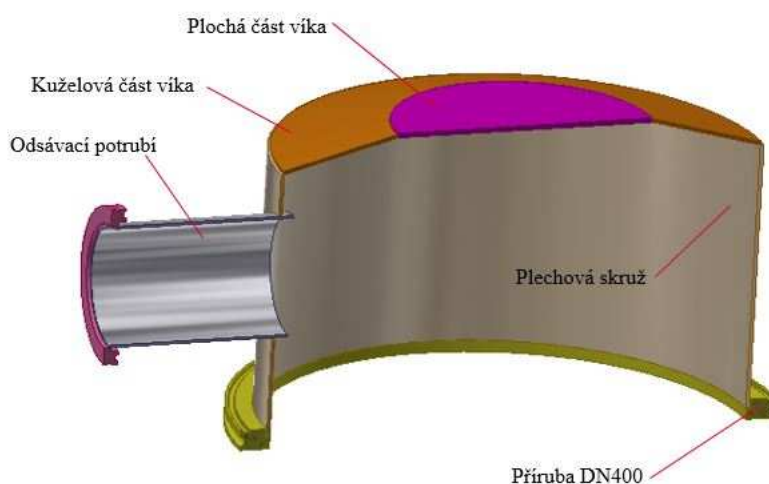
Po přesném vycentrování se pak příruby k sobě připojí spojovacími šrouby M8, které se následně dotáhnou na předepsaný utahovací moment tak, aby byl spoj vzduchotěsný. Způsob centrování viz Obrázek 5-4.



Obrázek 5-4 - Centrování přírub

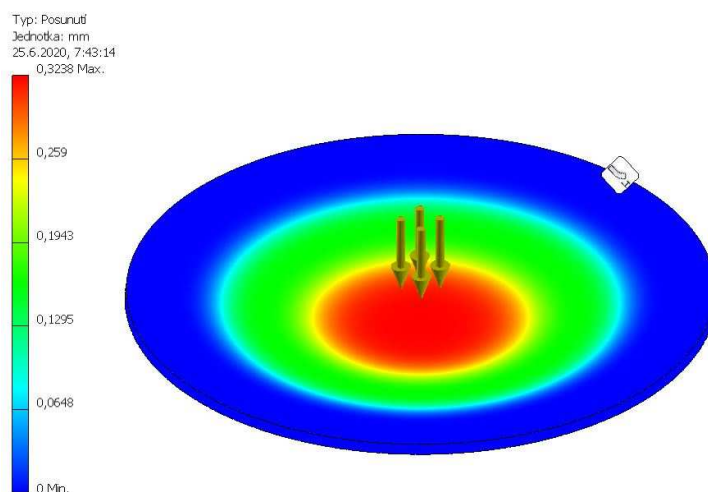
Horní část komory

Protože trubka o světlosti 400 mm je těžko dostupná a poměrně drahá, je válcová část pláště komory řešena jako skruž z plechu o tloušťce 3 mm (viz Obrázek 5-5). K ní je následně přivařena příruba ISO K, aby bylo možné na sebe napojit horní a spodní část komory. Ve válcové části pláště je také zhotoven otvor o průměru 104 mm pro vložení odsávací trubky, které tvoří normalizovaná trubka DN100 o síle stěny 2 mm. Na trubku je přivařena příruba ISO K, aby bylo možné zařízení připojit na vývěvu.



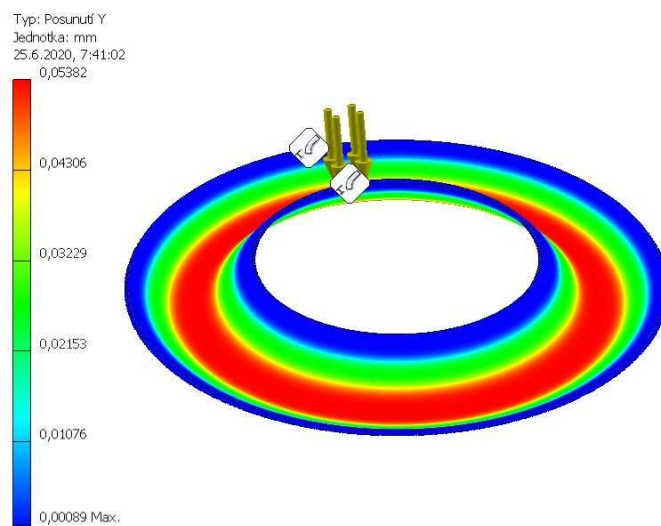
Obrázek 5-5 - Segmenty horní části komory

Horní část (víko) pláště je rozdělena na dva segmenty – kuželový a plochý. Je to z důvodu lepšího rozložení napětí a zmenšení deformací (viz Obrázek 5-6). Pokud by horní víko pláště bylo pouze ploché, hrozily by po odčerpání vzduchu z komory velké deformace víka a tím pádem poškození. Pro řešení pevnostních analýz bylo užito programu Autodesk Inventor.



Obrázek 5-6 – Průběh posunutí na ploché části víka

Kuželový segment má vrcholový úhel 15° a průměr jeho horní části je 215 mm. Kvůli optimalizaci napětí má rozdílnou tloušťku s plochým segmentem. Tloušťka kuželového segmentu (viz Obrázek 5-7) je 3 mm a tloušťka plochého (viz Obrázek 5-6) je 4 mm.



Obrázek 5-7 Průběh napětí na kuželové části víka

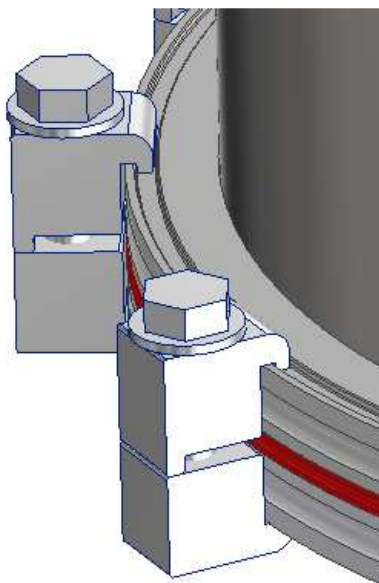
Pevnostní analýza segmentů pláště komory

Při analyzování napětí v částech komory bylo použito zatížení tlakem 0,1 MPa z vnější strany, což přibližně simuluje podmínky při vyčerpání vzduchu komory – tedy v komoře nulový tlak a z vnější strany tlak atmosférický.

Montáž komory

Při testování ložiska bude třeba opakovaně oddělit a spojit spodní díl komory s horním pro potřeby vyjmutí ložiska pro další analýzy. Z toho důvodu je nutné, aby montáž a demontáž byla co nejméně náročná. Použití přírub typu ISO K umožňuje použití přírubových svorek (viz Obrázek 5-8). Oproti přírubě typu CF, které se dotahují pomocí šroubů, jsou vyráběny pouze do průměru DN350. Navíc u průměru DN350 už musí být použito 36 spojovacích šroubů (viz příloha 18).

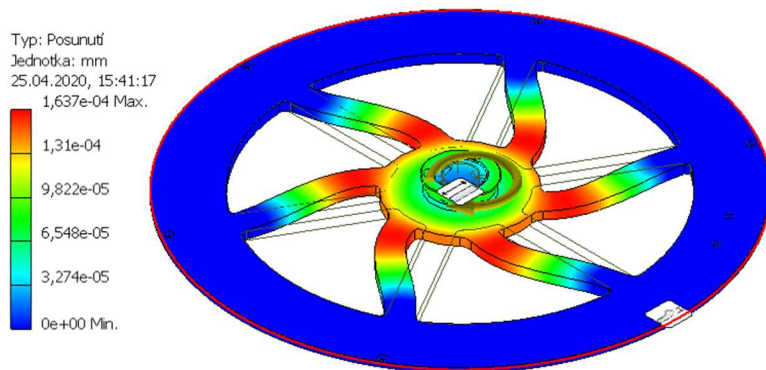
K přitažení přírub ISO K-DN400 je použito pouze 12 svěrek [3]. To značně urychlí montáž i demontáž.



Obrázek 5-8 - Přírubové svěrky

5.2 Torzní tuhost zařízení

Pro co nejpřesnější měření vlastností ložiska bylo třeba stanovit chybu měření. Tato chyba vzniká vlivem deformace komponent přenášejících krouticí moment. Pomocí programu Autodesk Inventor byly provedeny pevnostní analýzy (viz Obrázek 5-9) těchto komponent. Ze zjištěných hodnot posunutí vzhledem k ose rotace součástí pak bylo možné vypočítat torzní tuhosti jednotlivých součástí (viz příloha 19).



Obrázek 5-9 - Pevnostní analýza horního víka vnější klece

Výpočet torzní tuhosti spočíval v tom, že se zjistila velikost a místo posunutí kontrolované součásti při působení krouticího momentu 1 Nm. Hodnota posunutí se poté přepočítala na úhel natočení, který sloužil k vypočtení torzní tuhosti.

Torzní tuhost se spočítá

$$k = \frac{\text{krouticí moment}}{\text{úhel natočení}} \left[\frac{\text{Nm}}{^\circ} \right] [1]$$

Součásti kontrolované na torzní tuhost viz Tabulka 1.

Tabulka 1 - Kontrolované součásti

Název součásti	Torzní tuhost [Nm/°]
Vnější pouzdro	70709
Víko klece	18983
Spojka Smartflex	69
Hřídel	149
Unašeč ložiska	165
Spodní kroužek	4021
Spojka Roba DX	296
Příruba motoru	931
Převodovka	420

Pro potřeby výpočtu torzní tuhosti celého zařízení lze jako model použít soustavu sériově zapojených torzních pružin.

Celková torzní tuhost tedy bude

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^{n=9} \frac{1}{k_i} \quad [2]$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{70709} + \frac{1}{18983} + \frac{1}{69} + \frac{1}{149} + \frac{1}{165} + \frac{1}{4021} + \frac{1}{296} + \frac{1}{931} + \frac{1}{420} = 29,3 \frac{Nm}{\circ} \quad [3]$$

Z toho pak lze zjistit krouticí moment potřebný pro natočení součástí o jeden stupeň.

$$M_k = k * \varphi = 29,3 * 1 = 29,3 \text{ Nm} \quad [4]$$

Pro natočení součástí o jeden stupeň by tedy bylo třeba vyvinout krouticí moment o velikosti 29,3 Nm. Takto vysoký moment však při správné funkci ložiska působit nemůže a skutečné zatížení bude mnohem menší. Při porovnání tuhostí původního a současného zařízení, která činí 29,9 Nm lze usoudit, že torzní tuhost má podobný vliv na přesnost měření.

5.3 Hřídel

Konstrukce hřídele (viz Obrázek 5-10) je stejná jako u původního zařízení. Od původního hřídele se liší pouze délkou, nový hřídel je o 50 mm delší. Díky tomu, že je na původní přírubě vakuové komory nasazena další příruba, bylo nutno zvětšit odsazení spodního kroužku obepínajícího vnější kroužek ložiska od čelní plochy příruby. Dalším důvodem prodloužení je potřeba většího prostoru pod spodním kroužkem kvůli zakomponování rotační stupnice RESM20 na spodní kroužek. Horní strana obsahuje čtyři závitové otvory pro šrouby M4 k upevnění spodního kroužku.



Obrázek 5-10 - Hřídel

5.4 Upevnění vnějšího kroužku ložiska

Spodní přítlačný kroužek

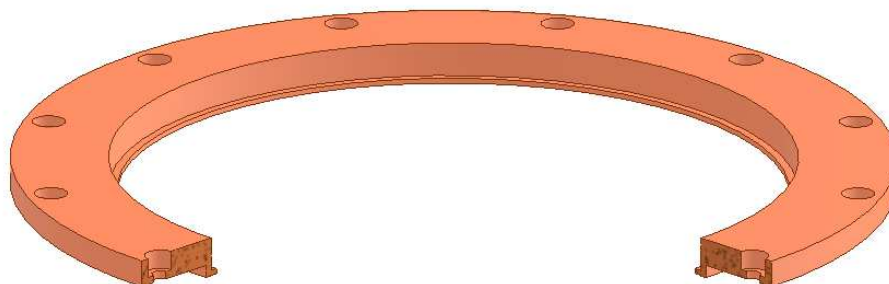
Je přišroubován k hřídeli pomocí čtyř zápusťných šroubů M4 a obepíná vnější kroužek testovaného ložiska. Jeho základní konstrukce opět vychází z konceptu původního zařízení. Na jeho spodní stranu však byl přidán kužel o vrcholovém úhlu 30° sloužící pro nasazení rotační stupnice RESM20 o průměru 255 mm. Kuželovitost spodní strany kroužku zajistí přesné vystředění rotační stupnice. Na čelní ploše kuželové části jsou provrtány čtyři otvory pro uchycení termočlánků (viz Obrázek 5-11). Tyto díry pro závit jsou průchozí, a to z toho důvodu, že při zašroubování šroubů do slepé díry se mohou vytvářet vzduchové kapsy, což je u vakuové aplikace nežádoucí jev. Na obvodu je vyvrtáno střídavě 12 průchozích děr se závitem M3 pro uchycení rotační stupnice a 12 průchozích děr se závitem M4 pro dotažení horního přítlačného kroužku.



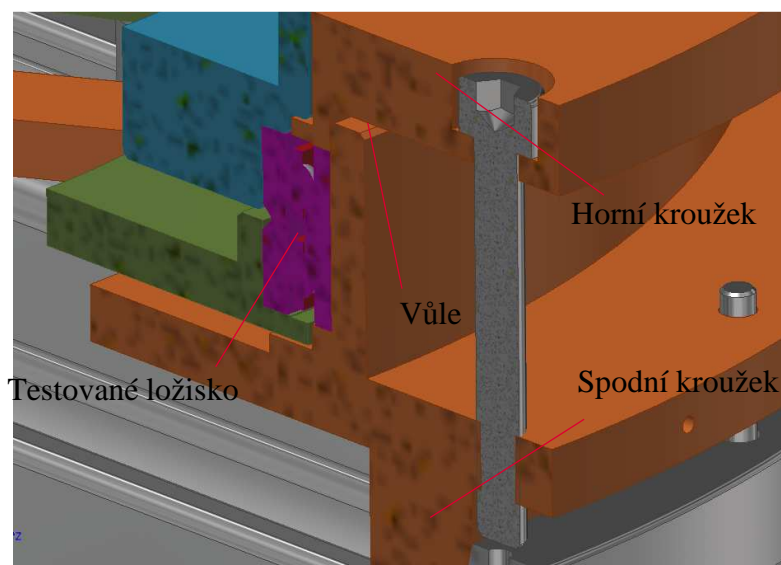
Obrázek 5-11 - Spodní přítlačný kroužek

Horní přítlačný kroužek

Jeho provedení je stejné, jako tomu bylo u původního zařízení (viz Obrázek 5-12). Horní a spodní kroužek spolu tvoří uložení. Spodní část kroužku musí mít dostatečnou výšku na to, aby šlo bezpečně dosáhnout požadované svěrné síly pro upnutí vnějšího kroužku ložiska bez vzájemného kontaktu čelních ploch přítlačných kroužků (viz Obrázek 5-13).



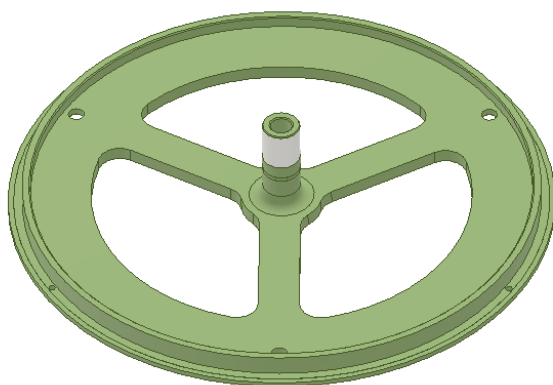
Obrázek 5-12 - Horní přítlačný kroužek



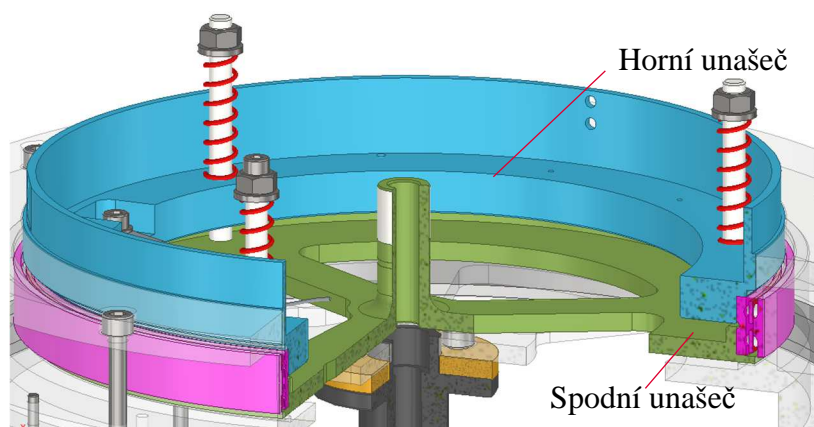
Obrázek 5-13 - Upevnění vnějšího kroužku ložiska

5.5 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Vnitřní kroužek je stejně jako u původního zařízení upnut mezi unašeče. Konstrukce se od původního zařízení neliší. Některé prvky byly pouze optimalizovány. Došlo k optimalizaci odlehčovacích otvorů na spodním unašeči tak aby byl unašeč při svých rozměrech co nejlehčí a zároveň si zachoval co nejvyšší tuhost (viz Obrázek 5-14).

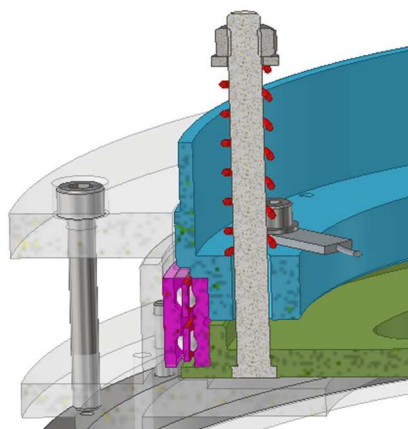


Obrázek 5-14 - Spodní unašec



Obrázek 5-15 - Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Stejně jako v případě původního zařízení je vnitřní kroužek ložiska upevněn pomocí dvou unašců (viz Obrázek 5-15) a předepnut pomocí tří čepů se závitem M6 využitých z původního zařízení (viz Obrázek 5-16) pomocí dotažení matice na pružinu. Z hlediska snížení nákladů jsou pro předepnutí použity stejné pružiny jako u původního zařízení, pružiny Alcomex D2170 o tuhosti $c = 4,86 \text{ N/mm}$ [4].



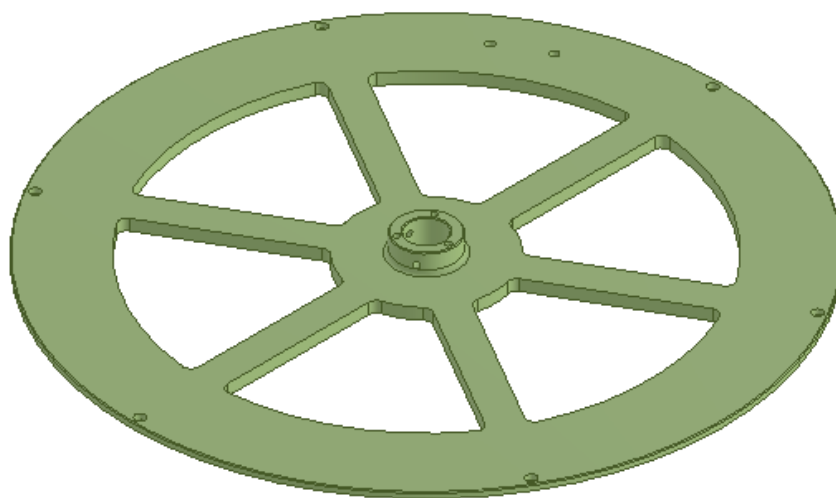
Obrázek 5-16 - Detail předepnutí vnitřního kroužku ložiska

5.6 Vnější klec

U vnější klece bylo nutno změnit poměr její výšky a průměru. Hlavním rozměrem je zde průměr klece kvůli zakomponování zařízení pro snímání přesné polohy ložiska. Bylo nutné zajistit dostatek prostoru pro čtecí hlavu enkodéru a její držák (viz kapitola 4.1.3).

Horní pouzdro klece

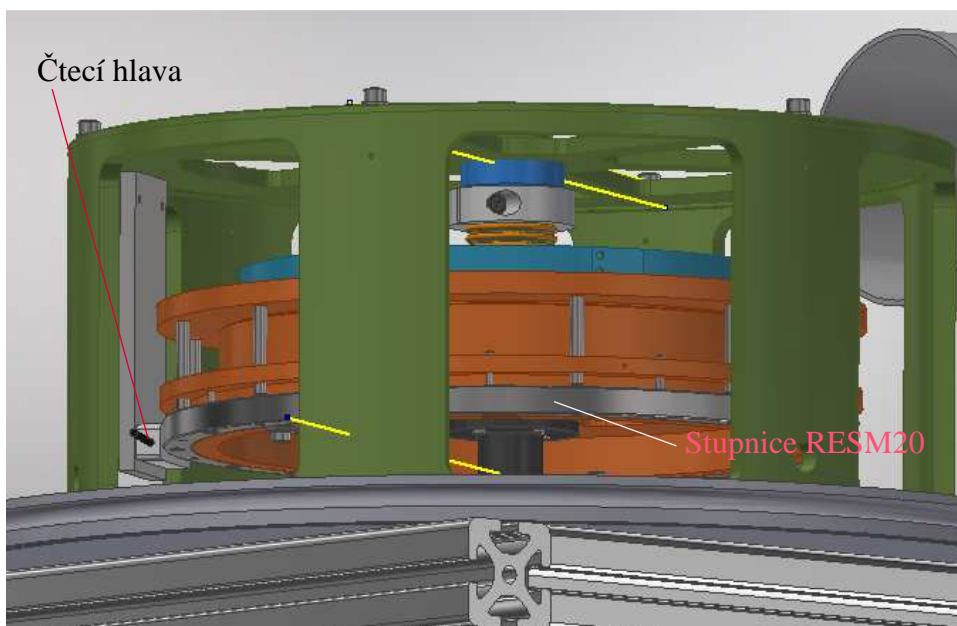
Zde došlo oproti původnímu zařízení pouze k jedné konstrukční změně-přidání dvou otvorů pro šrouby M3 upevňující držák čtecí hlavy enkodéru (viz Obrázek 5-17).



Obrázek 5-17 - Horní víko vnější klece

5.7 Snímání přesné polohy ložiska

Jak bylo již výše zmíněno (viz 4.1.3), zařízení je doplněno o systém pro snímání přesné polohy ložiska. Princip je takový, že na spodním přítlačném kroužku, který se otáčí zároveň s hřídelem je na kuželové části nasazena rotační stupnice RESM20 o vnějším průměru 255 mm zajištěná pomocí dvanácti šroubů M3. Ta v kombinaci s lineární inkrementální čtecí hlavou TONiC připevněnou na držáku k hornímu pouzdro klece snímá úhel otočení spodního přítlačného kroužku oproti nastavenému nulovému bodu. Kabel od čtecí hlavy je vyveden ven ze zařízení odsávacím potrubím. Komponenty (viz Obrázek 5-18) jsou zakoupeny od firmy Renishaw.



Obrázek 5-18 - Snímání přesné polohy ložiska

Držák čtecí hlavy

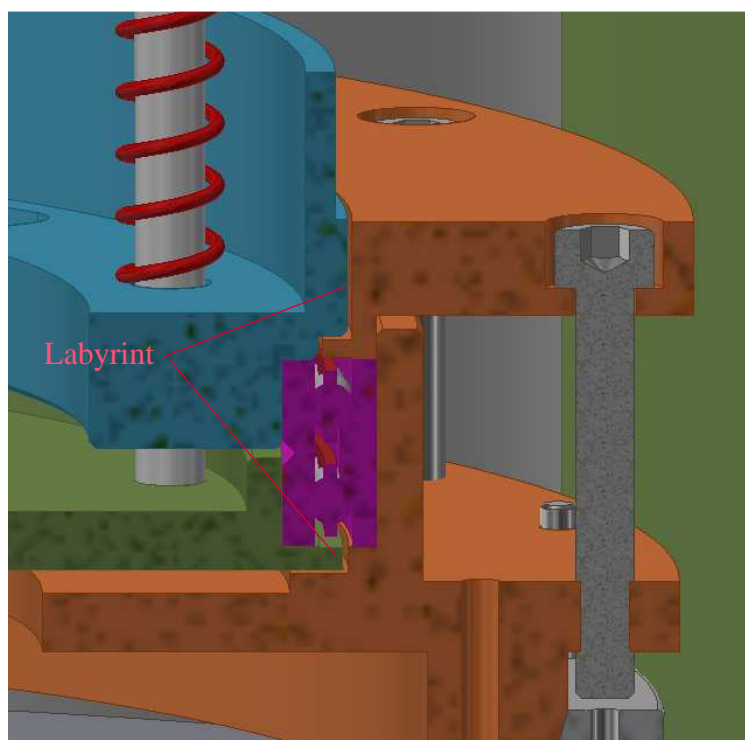
Konstrukce držáku čtecí hlavy (viz Obrázek 5-19) byla zvolena nejjednodušší možná. Je vyroben z plechu 6x36x110 mm. Horní část obsahuje dva otvory pro šrouby M4 k uchycení držáku na horní pouzdro klece. Díry vyvrtané kolmo na tyto otvory slouží k zamezení tvorby vzduchových kapes, jak bylo již zmíněno v kapitole 5.4. Na spodní straně jsou zhotoveny průchozí otvory pro šroub M3. Skrze ně se prostrčí dva šrouby, které přichytí čtecí hlavu k držáku.



Obrázek 5-19 - Držák čtecí hlavy

5.8 Labyrint

Protože při změnách teploty a působení vakua dochází ke změně vlastností maziva, je nutno nějakým způsobem omezit vypařování a únik maziva z ložiska. Řešením této situace je vytvoření labyrintu mezi kroužky a unašeči, obepínajícími ložisko (viz Obrázek 5-20). Šířka mezery mezi součástmi v labyrintu vychází z původní konstrukce a je 0,2 mm. Tvar vychází také z původního zařízení.



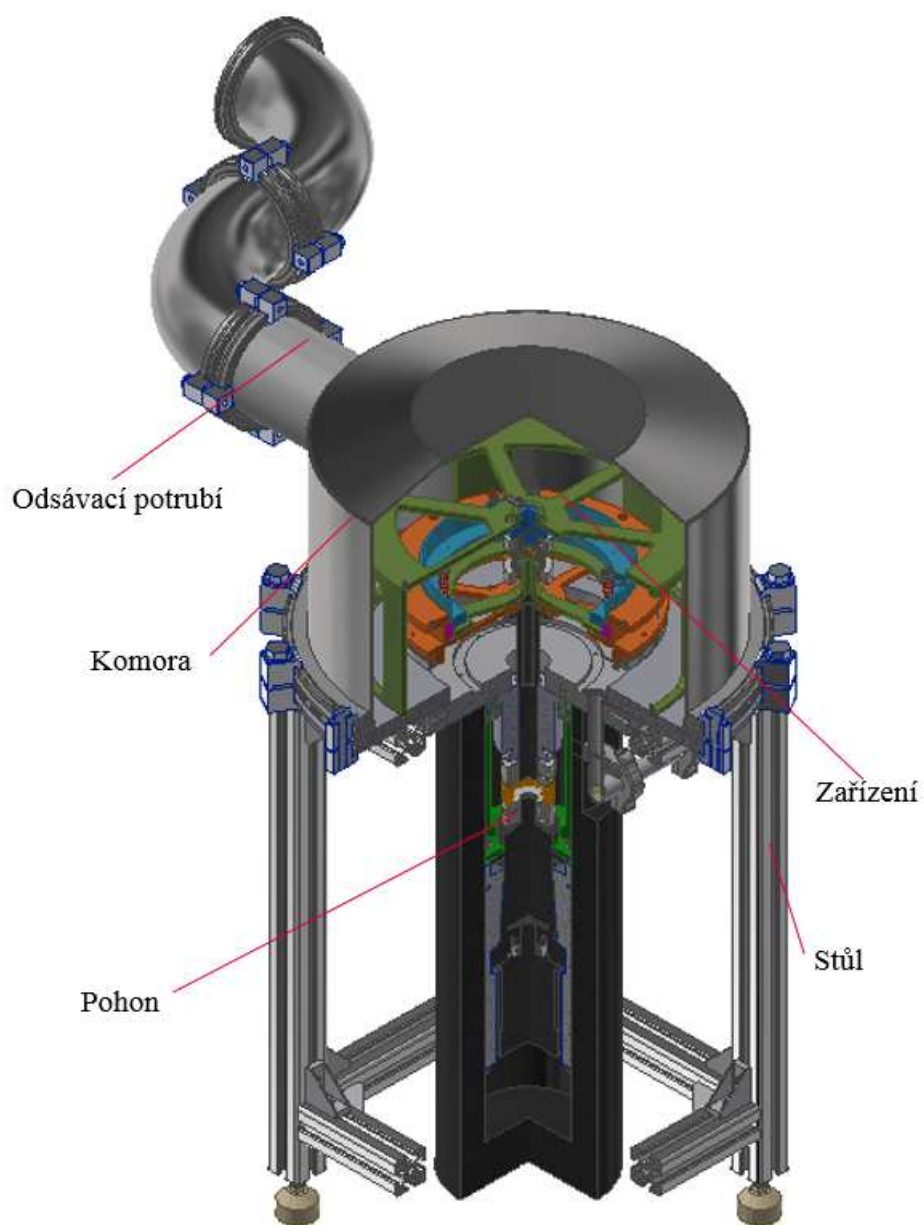
Obrázek 5-20 - Detail labyrintu mezi kroužky

5.9 Tepelné mosty

Způsob řešení zůstává nezměněn oproti původnímu zařízení (viz 2.1.15). Je zapotřebí pouze použití delších vodičů.

5.10 Celková dispozice zařízení

Části řešené v předchozích kapitolách tvoří celek, jehož dispozice je znázorněna na obrázku 5-21.



Obrázek 5-21 - Celková dispozice nového zařízení

6 DISKUZE

Bakalářská práce řeší úpravu již existujícího zařízení pro testování ložisek, aby na něm bylo možno otestovat jiné – větší ložisko. Jako první byla provedena rešerše původního zařízení, na jejímž základě byly vytvořeny dva koncepty možné úpravy. První koncept uvažoval s umístěním testeru do vakuové komory, kterou disponuje firma, ve které budou testy provedeny. Myšlenkou druhého konceptu bylo vytvořit nástavbu na komoru původního zařízení, do níž se nové zařízení umístí. Hlavní prioritou bylo maximální využití původních komponent. Ovšem díky značně většímu ložisku, a tedy i zařízení, nebylo ani v jednom konceptu možno využít více než polovinu původních komponent. Druhý koncept uvažoval zachování původního pohonného systému, čímž se odstranily komplikace s programováním, proto bude tento koncept realizován.

Dílčím úkolem bylo zakomponovat do zařízení aparaturu pro snímání přesné polohy vnějšího kroužku ložiska. Umístěním rotační stupnice na spodní přítlačný kroužek se značně eliminuje chyba měření polohy, protože spodní přítlačný kroužek je jednou ze součástí, které jsou v nejbližším kontaktu s ložiskem a zároveň s ním rotují.

Snahou nového návrhu je urychlit a zjednodušit montáž a demontáž zařízení při provádění testů na ložisku. U stávajícího zařízení bylo pro demontáž nutné povolit velký počet šroubů na přírubě, což značně prodlužovalo čas přípravy na testování a zvyšovalo náročnost. Použití jiného typu příruby, vhodného pro použití svorek, jejichž potřebný počet je menší, než je počet šroubů na původní přírubě, operaci montáže a demontáže výrazně zkracuje. Celkově je nové zařízení větší, a tím pádem těžší než zařízení původní. Nově upravené zařízení váží 100 kg oproti původnímu zařízení vážícímu 79 kg. Manipulace se zařízením tedy bude snadnější ve dvou osobách. Také bylo nutno jinak řešit odsávací potrubí díky změně konstrukce komory. Namísto použití kolen, jak je řešeno v této bakalářské práci, by také bylo možno pro připojení k vyvěvě použít speciální trubkovitou vlnovcovou koncovku, která je pružná a tak umožní mírně zkorigovat umístění zařízení v termální komoře.

Koncepty součástí pro upevnění ložiska vycházely z původního zařízení. Některé součásti byly pouze optimalizovány, aby si zachovaly co nejvyšší tuhost a zároveň byly co nejlehčí. Na spodní přítlačný kroužek byly přidány prvky pro uchycení rotační stupnice pro měření polohy pomocí enkodéru.

Dalo by se zde však také uvažovat o jiné konstrukci vnější klece, která upevňuje pouzdro se snímačem krouticího momentu. Vzhledem k velikosti ložiska má klec dosti velký průměr, a tedy vzhledem k tomu, že je klec vyrobena technologií soustružení a frézování, je zde spotřeba materiálu na její výrobu velmi vysoká.

Další potenciální problém by mohly v budoucnu působit tepelné mosty, jelikož u nových součástí probíhá tepelná výměna na výrazně větších plochách, a tedy je pomalejší.

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo upravit zařízení pro testování ložisek tak, aby na něm bylo možné testovat větší ložisko. Další úkolem bylo zapracovat do zařízení systém pro snímání přesné polohy ložiska.

Ve druhé kapitole bakalářské práce byl podrobně popsán současný stav testovacího zařízení včetně popisu jednotlivých funkčních celků a komponent, které je tvoří. Další část druhé kapitoly se zabývala teorií měření polohy, především pomocí optické metody.

V kapitole zabývající se koncepčním řešením byly rozpracovány dvě varianty konceptů pro přestavbu zařízení. První koncept uvažoval s umístěním testeru do externí vakuové komory. Tento koncept měl dvě varianty. První varianta nechávala pohonný systém mimo vakuovou komoru. Druhá varianta počítala s využitím krokového motoru vhodnému k použití ve vakuu. Obě tyto varianty však s sebou nesly řadu problémů, jako např. nutné přeprogramování pohonu v důsledku použití jiných součástí nebo složitější konstrukční řešení. Druhý koncept vycházel z původního zařízení, tedy bylo zařízení umístěno do vlastní vakuové komory. Z hlediska finanční náročnosti se jedná o úspornější řešení než předchozí koncept, avšak díky velikosti ložiska zde nebylo možno použít většinu komponent z původního zařízení.

Následně bylo rozebráno konstrukční řešení druhého konceptu. Kapitola se zabývala konstrukcí nové vakuové komory a optimalizací ostatních součástí, které bylo nutno vyrobit nově. Součásti vycházely z konceptu původních součástí. Dále byla ověřena torzní tuhost nových součástí a porovnána s torzní tuhostí součástí původních. Také zde byl popsán způsob uchycení aparatury pro snímání polohy ložiska.

I přes větší velikost se zařízení vejde do termální komory bez potíží. Navíc na něm nově lze i korigovat osovou výšku pomocí dvou 90° kolen na připojovacím potrubí. Montáž a demontáž bude díky použití jiného způsobu spojení přírub výrazně rychlejší a méně náročná. Pomocí kombinace rotační stupnice a optické čtecí hlavy je nyní také možné sledovat přesnou polohu ložiska s minimální úchylnou. Další výhodou nově navržené úpravy zařízení je, že komora bude využitelná i pro případ testování jiných velikostí ložisek.

Nově navržené součásti mají také podobný vliv na torzní tuhost zařízení, kde se tyto hodnoty pohybují v obou případech okolo 30 Nm/°.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHLUP, Tomáš. *Moderní snímače polohy*. Brno, 2008. Bakalářská. Mendelova Univerzita v Brně. Vedoucí práce Radovan Kukla.
2. FORMÁNEK, Josef. *Výukové texty pro předmět Automatické řízení výrobní techniky* [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka-arvt/Data/ivk-arvt-soubory/10-F.pdf>
3. Kurt J. Lesker Company: Stainless Steel ISO-K Weld Flanges (Metric Tube). *Kurt J. Lesker Company* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_iso_k.cfm?pgid=metricweldss
4. *E-shop Alcomex: Tlačné pružiny - Železné , Ø drátu 1.25 mm* [online]. [cit.2020-06-24]. Dostupné z: http://obchod.alcomex.cz/tlacne_pruziny.php?kat=Fe&d=1.25&pag=tl

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

M_k	krouticí moment
k	torzní tuhost
φ	úhel natočení
DN	jmenovitá světlost potrubí
c	Tuhost pružiny

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

10.1 Seznam obrázků

Obrázek 2-1 - Dispozice původního zařízení	14
Obrázek 2-2 - Původní vakuová komora	14
Obrázek 2-3 Pohled na přírubu shora	15
Obrázek 2-4 - Spodní strana příruby.....	15
Obrázek 2-5 – Hřídel.....	16
Obrázek 2-6 - Uchycení příruby	18
Obrázek 2-7 - Centrování příruby motoru	18
Obrázek 2-8 - Temperace pohonu	19
Obrázek 2-9 - Upevnění ložiska.....	19
Obrázek 2-10 - Horní unašeč	20
Obrázek 2-11 - Spodní unašeč shora (vlevo) a zespodu (vpravo).....	20
Obrázek 2-12 - Předepnutí unašečů	21
Obrázek 2-13 - Horní (vlevo) a spodní (vpravo) přítlačný kroužek	21
Obrázek 2-14 - Klec pro snímač krouticího momentu	22
Obrázek 2-15 - Labyrint mezi součástmi	22
Obrázek 2-16 - Tepelné mosty.....	23
Obrázek 2-17 - Princip inkrementálního odměřování [2]	24
Obrázek 2-18 - Princip absolutního odměřování [2]	25
Obrázek 2-19 – Princip inkrementálního snímače úhlu natočení [2].....	25
Obrázek 4-1 - Porovnání velikostí testovaných ložisek.....	27
Obrázek 4-2 - Rozměry původního zařízení	27
Obrázek 4-3 - Koncept s použitím kuželové převodovky	28
Obrázek 4-4 Koncept s krokovým motorem.....	29
Obrázek 4-5 – Dispozice zařízení ve vlastní komoře	30
Obrázek 4-6 - Dispozice nové komory	31
Obrázek 4-7 - Měření polohy pomocí rotační stupnice	32

Obrázek 5-1 Příruba z horní strany (nalevo) a ze spodní strany (napravo).....	33
Obrázek 5-2 - Centrovací přípravek	34
Obrázek 5-3 - Těsnění přírub.....	34
Obrázek 5-4 - Centrování přírub	35
Obrázek 5-5 - Segmenty horní části komory.....	35
Obrázek 5-6 – Průběh posunutí na ploché části víka.....	36
Obrázek 5-7 Průběh napětí na kuželové části víka.....	36
Obrázek 5-8 - Přírubové svěrky	37
Obrázek 5-9 - Pevnostní analýza horního víka vnější klece	38
Obrázek 5-10 - Hřídél.....	39
Obrázek 5-11 - Spodní přitlačný kroužek.....	40
Obrázek 5-12 - Horní přitlačný kroužek.....	41
Obrázek 5-13 - Upevnění vnějšího kroužku ložiska	41
Obrázek 5-14 - Spodní unašeč	42
Obrázek 5-15 - Upevnění vnitřního kroužku ložiska	42
Obrázek 5-16 - Detail předepnutí vnitřního kroužku ložiska	42
Obrázek 5-17 - Horní víko vnější klece	43
Obrázek 5-18 - Snímání přesné polohy ložiska	44
Obrázek 5-19 - Držák čtecí hlavy.....	44
Obrázek 5-20 - Detail labyrintu mezi kroužky	45
Obrázek 5-21 - Celková dispozice nového zařízení	46

10.2 Seznam grafů

Graf 1 - Vliv jednotlivých součástí na torzní tuhost.....	17
---	----

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Kontrolované součásti.....	38
--	----

12 SEZNAM PŘÍLOH

ČÍSLO VÝKRESU	NÁZEV
1. 2020-BP-01-000	Tester ložisek
2. 2020-BP-01-001	Stůl
3. 2020-BP-01-001/01	Profil 1
4. 2020-BP-01-001/04	Profil 4
5. 2020-BP-01-002	Vakuová komora
6. 2020-BP-01-005	Unašeč
7. 2020-BP-01-007	Přítlačný kroužek
8. 2020-BP-01-010	Horní kroužek
9. 2020-BP-01-011	Víko pouzdra
10. 2020-BP-01-013	Vnější rám
11. 2020-BP-01-031	Hřídel průchodky
12. 2020-BP-01-046	Držák čtecí hlavy
13. 2020-BP-01-002/01	Trubka D400
14. 2020-BP-01-002/02	Víko – kužel
15. 2020-BP-01-002/03	Víko – kruh
16. 2020-BP-01-002/05	Příruba – úprava
17. 2020-BP-02-001	Středicí přípravek

18. Příruba DN350 CF – Datasheet

19. Výpočty torzních tuhostí